

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

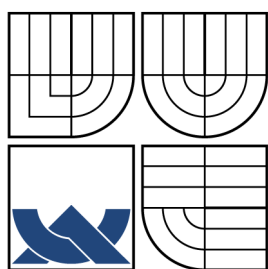
FOTOVOLTAIKA V MĚSTSKÝCH AGLOMERACÍCH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

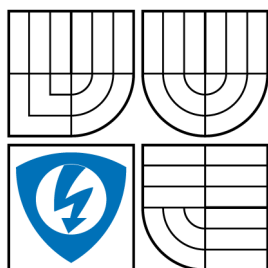
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

PAVEL DOBIÁŠ

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## FOTOVOLTAIKA V MĚSTSKÝCH AGLOMERACÍCH PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN THE CITIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

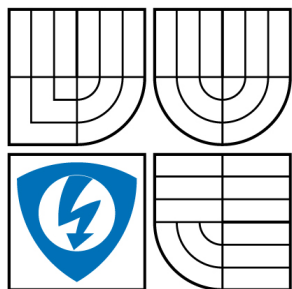
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

PAVEL DOBIÁŠ

VEDOUcí PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. PETR MASTNÝ, PH.D.

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

**Student:** Dobiáš Pavel

**ID:** 78030

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2007/2008

**NÁZEV TÉMATU:**

**Fotovoltaika v městských aglomeracích**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. využití solární energie - energetický potenciál Slunce
2. princip fotovoltaiky a současné technologie
3. využití systémů grid-off pro napájení zařízení - srovnání s EU
4. využití fotovoltaických systémů v Brně - energetická a ekonomická analýza

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

dle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 17.12.2007

**Termín odevzdání:** 4.6.2008

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Mastný, Ph.D.

**doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Pavel Dobiáš  
Bytem: Horní Sloupnice 226, 56553, Sloupnice - Horní  
Sloupnice  
Narozen/a (datum a místo): 22.10.1985, Ústí nad Orlicí

(dále jen "autor")

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

(dále jen "nabyvatel")

### Článek 1

#### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Fotovoltaika v městských aglomeracích

Vedoucí/školicel VŠKP: Ing. Petr Mastný, Ph.D.

Ústav: Ústav elektroenergetiky

Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☒ tištěné formě - počet exemplářů 1
- ☒ elektronické formě - počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 4.6.2008 .....

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce si klade za cíl seznámit čtenáře s problematikou fotovoltaických systémů a s jejich využití v různých aplikacích. V úvodní kapitole pojednává o tom, jaký potenciál spočívá v energii, která dopadá na Zem směrem od Slunce. Snaží se zanalyzovat základní problémy při využívání této energie. Další část se věnuje principu funkce jednoduchého polovodiče a vysvětluje princip funkce fotovoltaického článku. Následující část se zabývá konstrukcí a základními typy fotovoltaických článků a ukazuje možné směry jejich vývoje. V další části jsou analyzovány různé druhy fotovoltaických systémů a jejich použití v praxi. Poté je v této práci čtenář obeznámen s významem fotovoltaiky jako obnovitelným zdrojem a také s jeho podporou nejen na úrovni Evropské unie, ale také na národní úrovni České republiky. Poslední část se zabývá návrhem čtyř zařízení, které využívají fotovoltaický systém jako zdroj napájení, a které najdou využití v prostředí rozvinuté městské aglomerace.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

solární energie, polovodič, fotovoltaický článek, GRID-OFF, jízdenkový automat, parkovací automat

## **ABSTRACT**

This Bachelor thesis' main goal is to introduce a potential reader with the photovoltaic system questions and its utilization in many applications. In the leading chapter the thesis deals with the potential of the energy which is radiated from the Sun towards the Earth. It tries to analyze the common problems of using this energy. The next part deals with simple semiconductor operating principles and explain the principles of photovoltaic cell functions. The upcoming part deals with the construction and basic types of photovoltaic cells and show the possible ways in their development. In the next part there are analyzed many types of photovoltaic systems and their application in praxis. In the next part the reader is introduced with the meaning of photovoltaic as a renewable source and with its support in the European Union and Czech Republic. The last part deals with design of four devices which uses photovoltaic system as a power source and which can be used in the city agglomeration environment.

## **KEYWORDS**

solar energy, semiconductor, photovoltaic cell, GRID-OFF, ticket machine, parking machine

DOBIÁŠ, P. *Fotovoltaika v městských aglomeracích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektroenergetiky, 2008. Počet stran 90 s., Počet stran příloh 13 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Mastný, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Fotovoltaika v městských aglomeracích“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)



## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Petru Mastnému, Ph.D. za veškerou podporu při vytváření této bakalářské práce. Zvláštní dík patří mé rodině za morální a materiální podporu během studia.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>Využití solární energie, energetický potenciál Slunce</b>	<b>14</b>
1.1	Slunce jako zdroj energie . . . . .	14
1.2	Energetická spotřeba lidstva . . . . .	14
1.3	Využití slunečního záření na Zemi . . . . .	15
1.4	Fyzikální podstata světla . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Princip fotovoltaiky a současné technologie</b>	<b>19</b>
2.1	Fyzikální podstata funkce polovodiče . . . . .	19
2.2	Princip funkce fotovoltaického článku . . . . .	27
2.3	Výroba fotovoltaických článků . . . . .	30
2.4	Konstrukce fotovoltaických panelů . . . . .	31
2.5	Základní typy fotovoltaických článků . . . . .	34
2.5.1	Křemíkové monokrystalické články . . . . .	35
2.5.2	Články z polykrystalického křemíku . . . . .	35
2.5.3	Články z amorfního křemíku . . . . .	35
2.6	Další možnosti vývoje fotovoltaických článků . . . . .	36
2.6.1	Galiumarsenid (GaAs) . . . . .	36
2.6.2	Diselenid mědi a india (CuInSe <sub>2</sub> , CIS) . . . . .	36
2.6.3	Telurid kadmia (CdTe) . . . . .	36
2.6.4	Články využívající organické látky . . . . .	37
2.6.5	Nanostrukturní články . . . . .	37
2.6.6	Fotogalvanické články z vodivých polymerů . . . . .	37
2.6.7	Vícepřechodové články . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Využití systémů GRID-OFF pro napájení zařízení</b>	<b>40</b>
3.1	Systémy GRID-ON . . . . .	40
3.2	Autonomní solární systém bez akumulátoru . . . . .	40
3.3	Autonomní solární systém s akumulátorem . . . . .	41
3.4	Hybridní solární systém . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Fotovoltaika a Evropská unie</b>	<b>43</b>
4.1	Současná situace . . . . .	43
4.1.1	Evropská politika a fotovoltaika . . . . .	43
4.1.2	Národní politiky zemí EU a fotovoltaika . . . . .	44
4.1.3	Situace v České republice . . . . .	45

<b>5</b>	<b>Využití fotovoltaických systémů v Brně</b>	<b>49</b>
5.1	Lokální podmínky . . . . .	49
5.2	Získaná data pro vybrané místo . . . . .	49
5.3	Návrh fotovoltaických systémů . . . . .	51
5.3.1	Jízdenkový automat AVJ G napájený fotovoltaickým systémem	51
5.3.2	Parkovací automat SITTRAFFIC SITY 5 napájený fotovoltaickým systémem . . . . .	60
5.3.3	Informativní dopravní značka napájená fotovoltaickým systémem . . . . .	62
5.3.4	Solární napájení osvětlení domovního čísla . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>68</b>
	<b>Literatura</b>	<b>70</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>73</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>76</b>
<b>A</b>	<b>Podpora fotovoltaických technologií v Evropě</b>	<b>77</b>
<b>B</b>	<b>Mapy slunečního svitu v České republice</b>	<b>79</b>
<b>C</b>	<b>Roční průběhy veličin slunečního svitu získaných z PVGIS pro dané umístění</b>	<b>81</b>
<b>D</b>	<b>Roční průběhy veličin získaných z PVGIS pro zvolený FV panel</b>	<b>84</b>
<b>E</b>	<b>Vývoj nákladů pro varianty napájení jízdenkového automatu</b>	<b>86</b>
<b>F</b>	<b>Návrh akumulátoru informativní značky pro celoroční provoz</b>	<b>87</b>
<b>G</b>	<b>Přiložené CD</b>	<b>89</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Spektrum slunečního záření po průchodu zemskou atmosférou . . . . .	15
2.1	Atom křemíku se znázorněnými energetickými hladinami . . . . .	20
2.2	Atomy křemíku ve vlastním polovodiči [12] . . . . .	20
2.3	Hustota stavů u vlastního polovodiče na jednotkový interval energie[1] . . . . .	21
2.4	Funkce pravděpodobnosti $f(E)$ a $1 - f(E)$ [1] . . . . .	21
2.5	Koncentrace elektronů a děr u vlastního polovodiče[1] . . . . .	22
2.6	Atomy polovodiče typu N s donorovým atomem As [12] . . . . .	22
2.7	Hustota stavů u polovodiče typu N[1] . . . . .	23
2.8	Pravděpodobnostní funkce pro polovodič typu N[1] . . . . .	23
2.9	Množství elektronů a děr v polovodiči typu N[1] . . . . .	24
2.10	Atomy polovodiče typu P s akceptorovým atomem B [12] . . . . .	24
2.11	Ostrý přechod mezi oblastí N a P[1] . . . . .	25
2.12	Nepolarizovaný PN přechod[1] . . . . .	25
2.13	Schéma energetických hladin polovodičového článku[1] . . . . .	27
2.14	Neosvětlený fotovoltaický článek[1] . . . . .	27
2.15	Osvětlený fotovoltaický článek[1] . . . . .	28
2.16	Spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou, které je schopen fotovoltaický článek absorbovat [1] . . . . .	28
2.17	Zatěžovací charakteristika fotovoltaického článku pro různé intenzity osvětlení [1] . . . . .	29
2.18	Změna zatěžovací křivky v závislosti na teplotě [1] . . . . .	30
2.19	Výrobní cyklus křemíku [1] . . . . .	31
2.20	Jednoduchý článek a článek s vysokou účinností [1] . . . . .	32
2.21	Diagram vývoje vícepřechodových článků [3] . . . . .	38
4.1	Vývoj instalovaného výkonu v ČR[9] . . . . .	47
4.2	Struktura instalovaného výkonu [9] . . . . .	47
5.1	Principiální schéma zapojení fotovoltaického systému . . . . .	57
5.2	Předpokládaný průběh nákladů pro 20 let provozu jízdního automatu pro různá řešení napájení . . . . .	59
5.3	Informativní značka "Přechod pro chodce" s LED diodami . . . . .	62
5.4	Předpokládaný průběh nákladů pro 20 let provozu informativní značky pro různá řešení napájení . . . . .	65
B.1	Roční průměrný uhrn slunečního záření [15] . . . . .	79
B.2	Roční průměrná doba slunečního záření [15] . . . . .	79
B.3	Roční průměrný počet bezoblačných dní [15] . . . . .	80
C.1	Průběh slunečního svitu ve vybrané lokalitě během roku[14] . . . . .	81
C.2	Průběh úhlu ideálního sklonu panelu během roku[14] . . . . .	81

C.3	Průběh Linkeho atmosferického zákalu během roku[14]	82
C.4	Průběh poměru difúzního ku globálnímu záření ve vybraném místě během roku[14]	82
C.5	Průběh průměrné denní a 24 hodinové teploty během roku[14]	83
C.6	Průběh koeficientu HDD během roku pro dané místo[14]	83
D.1	Předpokládána měsíční vyrobená elektrická energie[14]	84
D.2	Předpokládané průměrné osvětlení panelu[14]	84
D.3	Mezní chody Slunce po obloze v roce[14]	85

# SEZNAM TABULEK

4.1	Rozdělení licencí k provozování FV systémů v ČR podle krajů [9]	48
5.1	Získaná data o slunečním svitu pro zvolené místo z PVGIS[14]	50
5.2	Technické parametry panelu Kyocera KC130GHT-2 [21]	52
5.3	Roční hodnoty hodnot pro vybraný panel a jeho umístění [14]	53
5.4	Průběh množství vyrobené elektrické energie během doby provozu FV panelu	54
5.5	Bilance vyrobené a spotřebované elektrické energie v průběhu roku	56
5.6	Investiční náklady pro zřízení napájení automatu fotovoltaickým sys- témem	58
5.7	Investiční náklady pro zřízení napájení automatu z distribuční sítě pro různé varianty	58
5.8	Vyrobena elektrická energie v jednotlivých měsících během roku [14]	61
5.9	Investiční náklady pro napájení automatu fotovoltaickým systémem	61
5.10	Technické parametry panelu Kyocera KC85T-1[21]	63
5.11	Rozpis položek pro napájení informativní značky fotovoltaickým sys- témem	64
5.12	Energetická analýza vyrobené elektrické energie a nabití baterie v průběhu roku	66
5.13	Rozpis nákladů na konstrukci solárního osvětlení čísla domu	67
A.1	Národní programy podpory FV v zemích EU a Švýcarska [10]	77
A.2	Pokračování tabulky A.1	78
E.1	Vývoj nákladů pro jednotlivé varianty řešení napájení ve sledovaném období	86
F.1	Návrh akumulátoru pro roční provoz	87
F.2	Vývoj jmenovitého výkonu fotovoltaického během provozu	88

# 1 VYUŽITÍ SOLÁRNÍ ENERGIE, ENERGETICKÝ POTENCIÁL SLUNCE

## 1.1 Slunce jako zdroj energie

Veškerá energie vyskytující se na Zemi pochází ze Slunce. Tato energie může být uložena v chemické podobě ve fosilních palivech, jako energie biomasy v rostlinách a živočiších, jako energie světelná v dopadajícím záření či jako energie tepelná, která ovlivňuje dění v atmosféře, koloběh vody v přírodě. Ve vnitru Slunce probíhá jaderná fúze - spojování jader vodíku, při kterém vzniká hélium a další těžší prvky. Slunce každou sekundu přemění kolem 600 milionů tun vodíku na hélium. Podle známého Einsteinova vzorce  $E = m \cdot c^2$  lze rozdíl mezi hmotnostmi přepočítat na energii. Na Slunci se tedy každou sekundu přemění 4,26 milionu tun hmoty, což představuje uvolnění zhruba  $3,8 \cdot 10^{26}$  J energie.

Slunce, jako hvězda, se v současnosti nachází ve stabilní fázi svého vývoje, je v ní už asi 4,6 miliardy a předpokládá se, že v ní ještě asi 5 miliard let zůstane. Jde tedy z hlediska lidského života a lidské společnosti o nevyčerpatelný zdroj energie.

Na konci této stabilní fáze se předpokládá, že Slunce svůj objem zvětší asi 1,4krát, vyčerpá zásoby vodíku ve svém nitru, zapálí se tenká vrstvička vodíku obalující jeho jádro, to se pak smrští. Vnitřní část Slunce bude expandovat a stane se z něj "červený obr", který pohltí většinu planet ve sluneční soustavě. V heliovém obalu začne probíhat fúze helia, za vzniku uhlíku a kyslíku. Řídký obal, kterým bude obklopotvat žhavé jádro, se tlakem záření odsune do prostoru. Na konci tohoto děje zůstane jen uhlíko-kyslíkové jádro o 60% hmotnosti původního Slunce obalené tenkou vodíkovou vrstvou. Tento zbytek začne chladnout a stane se "bílým trpaslíkem" a až vychladne úplně, stane se ze Slunce "černý trpaslík". Teplota na povrchu dnešního Slunce je asi 5900 K a jeho energie k nám proudí jako elektromagnetické záření.

## 1.2 Energetická spotřeba lidstva

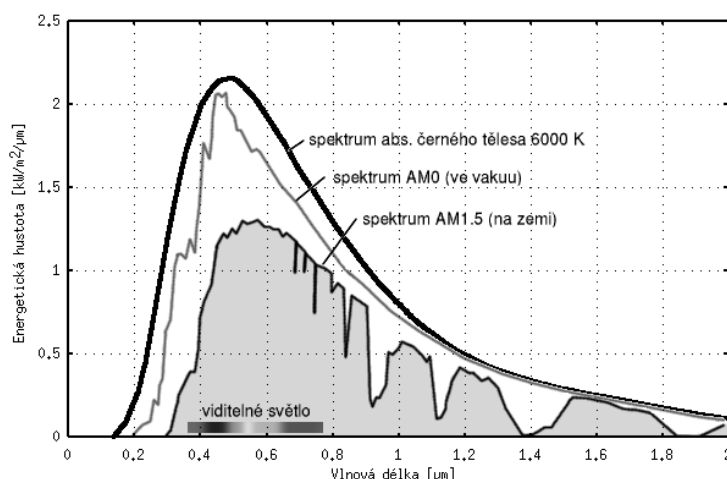
Současná civilizace potřebuje pro svůj rozvoj stále více energie a potřebuje najít nové a perspektivní zdroje energie. V současné době se většina elektrické energie získává v tepelných a jaderných elektrárnách. Uvádí se, že spotřeba technosféry je asi 10 TW (všechna fosilní paliva, energie biomasy a energie uložená v potravinách). Dle dostupných zdrojů na hranici zemské atmosféry dopadá asi  $1,4 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  energie (solární konstanta). Celý zemský povrch je vystaven zářivému výkonu 180 000 TW. Teoreticky by tedy veškerý zářivý výkon dopadající na zemský povrch bohatě pokryl energetickou spotřebu lidstva.

### 1.3 Využití slunečního záření na Zemi

Pokud chceme začít využívat energii Slunce na zemském povrchu, musíme nejprve znát její využitelný potenciál v místě instalace zařízení. Je rozdíl v instalaci fotovoltaických panelů mimo zemskou atmosféru a přímo na zemském povrchu. Za hranicemi atmosféry jsou podmínky svitu Slunce dokonale předvídatelné, lze přesně předpovídat dobu, čas a intenzitu slunečního záření. Panely mohou zastíněny pouze Zemí, popřípadě jiným nebeským tělesem, což je předvídatelné a zastínění netrvá příliš dlouho dobu. Rovněž, není problém zajistit panelům kolmou polohu vůči Slunci.

Instalace panelů na Zemi sebou nese řadu dalších problémů. Sluneční záření, které dorazí k Zemi skrze atmosféru je ovlivněno ději, které se v ní odehrávají a jejím znečištěním. Dále je třeba brát v potaz měnící se polohu Slunce na obloze během dne a roku (azimut a výška nad obzorem). Musíme také brát v potaz stínění objektů v okolí místa zamýšlené instalace.

Záření, které dopadá na zemský povrch, se velice liší od záření, jež přichází od Slunce na hranici zemské atmosféry. Část energie záření atmosféra odrazí zpět do vesmíru, část pohltí nebo rozptýlí. Kolik energie tedy dorazí k zemskému povrchu, záleží na momentálním stavu zemské atmosféry. Část záření rozptýlí nebo absorbují molekuly plynů tvořící atmosféru nebo na pevných či kapalných látkách přítomných v atmosféře. Veškeré záření, které dopadá na zemský povrch, se nazývá globálním zářením. Má dvě složky - přímou a difúzní (rozptýlenou). Rozptýlenou složku obsahuje záření především při zatažené obloze. Při jasné obloze dopadá na jeden metr čtverečný něco málo pod  $1\text{ kW}$  zářivého výkonu. Při zatažené obloze to už je zářivý výkon pouze v řádu desítek wattů.



Obr. 1.1: Spektrum slunečního záření po průchodu zemskou atmosférou



Na Obr. 1.1 je vidět spektrum slunečního záření, které dopadá na zemi. Jsou zde patrné intervaly vlnový délek, které atmosféra pohltí. Změní se zastoupení vlnových délek, a celkově se sníží intenzita záření.

Výška slunce nad obzorem ovlivňuje intenzitu záření. Sami to na vlastní kůži pociťujeme, že "slunce svítí více" v poledne, kdy je v nadhlavníku než navečer či ráno, když je těsně nad obzorem. Intenzita slunečního záření v různou denní dobu tedy záleží na jeho poloze na obloze, na tloušťce vrstvy vzduchu, kterou musí záření projít. Používá se takzvaný "Air Mass" faktor, který zohledňuje efektivní množství vzduchu ležící v cestě slunečním paprskům. Když je slunce nejvýše na obloze je AM faktor roven jedné. Množství slunečního záření, které dopadne na zem, rovněž záleží na nadmořské výšce, opět to souvisí s množstvím vzduchu, kterým musí sluneční paprsky projít. Při výběru lokality pro instalování fotovoltaických panelů musíme uvažovat i míru znečištění atmosféry, která je v okolí městských aglomerací větší než na venkově, nebo lokální klima daného místa, počet slunečných a oblačných dnů v roce.

Ke stanovení množství dopadajícího záření se používají pyranometry, které měří přímé i difúzní záření. Pracují na principu termočlánku a měří záření všech vlnových délek. Pokud však chceme měřit pouze přímé záření, použijeme přístroj zvaný pyrheliometr, který pracuje na podobném principu jako pyranometr. Je ovšem vybaven trubicí, která vymezuje úhel, pod kterým může záření k čidlu vstoupit.

Další data potřebná ke stanovení množství dopadajícího záření lze získat z meteorologických měření dlouhodobých klimatických průměrů pro dané místo[4].

## 1.4 Fyzikální podstata světla

Člověk vnímá světlo jako naprostou samozřejmost, pomáhá mu poznávat předměty kolem sebe, rozlišovat barvy. Život bez světla si většina z nás neumí vůbec představit. Světlo tvoří viditelnou část elektromagnetické záření. V minulosti se prokázala jeho fyzikální podstata a elektromagnetické záření našlo mnoho praktických aplikací, především v přenosu informací.

Časovou změnu elektrického pole doprovází změna magnetického pole a naopak. Vektory obou polí jsou navzájem kolmé a vlnění se šíří kolmo na oba vektory (směr šíření vlnění získáme vektorovým součinem vektoru intenzity elektrického pole a intenzity magnetického pole). Spektrum vlnových délek elektromagnetického vlnění je velice široké, začíná asi na  $10^{-13} m$  a sahá až po tisíce metrů. Ovšem světlo (viditelné spektrum elektromagnetického záření) tvoří jen úzký interval toho spektra  $\lambda = \langle 380; 760 \rangle nm$ , každá vlnová délka v tomto intervalu odpovídá určité barvě světla. Nejkratší vlnové délky odpovídají fialové barvě, se vzrůstající vlnovou délkou

se barva mění přes modrou, zelenou, žlutou až k červené. Sluneční světlo vnímáme jako bílé, protože je složeno ze spojitého spektra a obsahuje všechny jeho barvy. Sluneční světlo lze rozložit pomocí hranolu či optické mřížky a získat všechny barvy jeho spektra.

Přehled vlnových délek a jejich technické specifikace:

- *Gamma záření*, vlnové délky  $\lambda < 10^{-11} \text{ m}$ , použití v jaderné fyzice, defektoskopii.
- *Rentgenové záření*, vlnové délky  $\lambda = \langle 10^{-11}; 10^{-8} \rangle \text{ m}$ , lékařská diagnostika, defektoskopie, astronomie.
- *Ultrafialové záření*, vlnové délky  $\lambda = \langle 10^{-8}; 10^{-7} \rangle \text{ m}$ , solárium, fotochemie, kopírovací stroje.
- *Viditelné spektrum záření*,  $\lambda = \langle 3,8 \cdot 10^{-7}; 7,6 \cdot 10^{-7} \rangle \text{ m}$ , optika, fotografické stroje, světelné zdroje.
- *Infračervené záření*,  $\lambda = \langle 7,6 \cdot 10^{-7}; 10^{-4} \rangle \text{ m}$ , tepelné zářiče, grily, dálkové ovladače, IR kamery.
- *Mikrovlnné záření*,  $\lambda = \langle 10^{-4}; 10^{-1} \rangle \text{ m}$ , mikrovlnné trouby, radarové systémy, mobilní telefony.
- *Rádiové záření*,  $\lambda > 10^{-1} \text{ m}$ , rozhlas, televize, komunikační systémy.

Elektromagnetické vlny mají dualistický charakter. Chovají se jako vlny a zároveň jako částice. Přičemž vlnový charakter se více projevuje u vln s větší vlnovou délkou a částicový (korpuskulární) charakter se více uplatňuje u vln s kratší vlnovou délkou. Pokud má vlna částicový charakter, energie v ní se nešíří spojitě ale po kvantech - částech, které chápeme jako kvazičástice tj. částice s nulovou klidovou hmotností. Z toho důvodu má světlo i částicovou povahu a proto lze mluvit o vlnově částicovém dualismu.

Tím, že se světlo má vlnový charakter, můžeme u něj pozorovat vlastnosti typické pro obecné vlnění jako je zákon odrazu a lomu na rozhraní dvou prostředí, interferenční jevy, difrakci na optické mřížce a všechny důsledky Dopplerova jevu jako např. posun frekvence směrem k červenému okraji spektra známý jako "rudý posuv" nebo třeba změny frekvence způsobené obíháním hvězdy kolem těžiště s velkou planetou [1].

Projevy částicové povahy světla spadají do oboru kvantová mechanika. Záření se projevuje jako tok částic (kvazičástic), které se nazývají fotony. Jejich energii lze vyjádřit pomocí vztahu  $E = h \cdot f$ , kde  $h$  je Planckova konstanta a  $f$  je frekvence

záření. Vlnová délka je podle vztahu  $\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T$  nepřímo úměrná frekvenci záření, lze říci, že fotony s kratší vlnovou délkou (vyšší frekvencí) mají vyšší energii, než fotony s delší vlnovou délkou (nižší frekvencí). Lze tedy spočítat, že fotony viditelného záření mají energii v řádu  $eV$ , fotony gama záření disponují energií v řádech  $MeV$  a konečně částice mikrovlnného záření mají energie v řádu  $meV$ . Jako příklad projevu částicového charakteru je právě fotoelektrický jev. Sluší se na tomto místě zmínit Alberta Einsteina, který v roce 1921 získal Nobelovu cenu za objasnění toho jevu [1].

## 2 PRINCIP FOTOVOLTAIKY A SOUČASNÉ TECHNOLOGIE

### 2.1 Fyzikální podstata funkce polovodiče

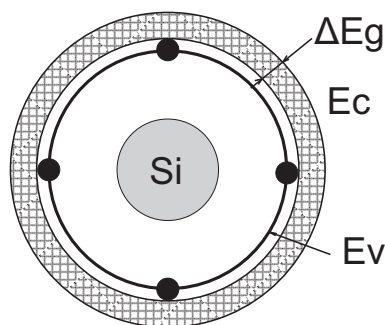
K přeměně elektromagnetického záření na elektrickou energii dochází v polovodičových fotovoltaických článcích na bázi krystalického křemíku. Tyto články patří mezi nejrozšířenější. Pro vysvětlení principu transformace energie bude postačující.

Polovodiče můžeme rozdělit do dvou skupin, na polovodiče vlastní (intrinzičné) a příměsové. Příměsové polovodiče mohou mít vodivost typu N - převaha záporných nosičů náboje (volných elektronů), nebo vodivost P - převaha kladných nosičů náboje (děr - místo chybějícího elektronu). Atom křemíku má strukturu diamantu a obsahuje 14 elektronů, v poslední (valenční) vrstvě obsahuje čtyři elektrony, které tvoří se svými sousedy kovalentní vazby. Za běžných okolností může energie volného elektronu nabývat libovolných hodnot. V křemíkovém krystalu však energie elektronu může nabývat pouze určitých hodnot v důsledku pohybu v periodickém potenciálu. Tyto energetické hladiny jsou rozděleny do "pasů dovolených energií" - tj. energií, kterých elektron může nabývat a "pasů zakázaných energií" - energií, kterých elektron nabývat nemůže.

Z hlediska funkce polovodiče jsou důležité tyto pásy:

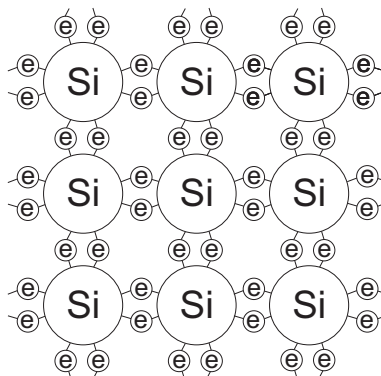
- *valenční pás elektronů* (za velmi nízkých teplot je poslední obsazen elektrony)  
Obsahuje energetické stavy valenčních elektronů. Těchto stavů je stejně jako valenčních elektronů, budou za velmi nízkých teplot obsazené a budou tvořit kovalentní vazby se sousedními atomy.
- *zakázaný pás energií* Těchto energetických stavů nemůže elektron nabývat.
- *vodivostní pás* (za velmi nízkých teplot je první neobsazený)  
Pokud se elektron dostane do toho pásu, může se volně pohybovat prostorem krystalové mřížky mezi atomy.

Energetická hladina, které odpovídá poslední hladině valenčního pásu, se označuje  $E_V$ , nejnižší hladina vodivostního pásu se označuje  $E_C$ , šířku zakázaného pásu  $\Delta E_G = E_C - E_V$ . Další důležitou energetickou hladinou je Fermiho energie  $E_F$ . U vlastního polovodiče (např. u čistého křemíku), leží Fermiho energie uprostřed zakázaného pásu.



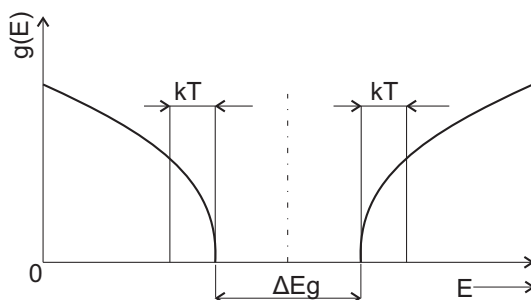
Obr. 2.1: Atom křemíku se znázorněnými energetickými hladinami

Dodáním energie, např. ohřátí (fononem), nebo osvětlením (fotonem) se elektron vytrhne z valenční vazby a přejde do vodivostního pásu. To se projeví v energetickém schématu tak, že elektrony obsadí vyšší energetické hladiny. Valenční a vodivostní pás se tak stanou částečně obsazenými. Z elektronů ve vodivostním pásu se stanou elektrony, schopné vést elektrický proud. Na volná místa, po elektronech ve valenčních pásech některých atomů, můžou přeskočit elektrony z jiných atomů. Tím dochází k přesunu prázdných míst k dalším atomům. V elektrickém poli se volné valenční elektrony pohybují proti směru intenzity elektrického pole, protože mají záporný náboj. Prázdná místa se tedy přesouvají ve směru intenzity pole. Toto místo se tedy chová jako částice s kladným nábojem. Tato částice se označuje jako "díra". Ve vlastním polovodiči se počet děr a volných elektronů rovná. Krystal se tedy navenek jeví elektricky neutrální. Je-li pár elektron-díra vygenerován díky dopadu fotonu, energie fotonu musí být větší nebo rovna šířce zakázaného pásu. Fotony s menší energií projdou, a s větší či stejnou jsou pohlceny. Šířka zakázaného pásu křemíku je zhruba  $1,1\text{ eV}$ . Je tedy transparentní pro fotony s větší vlnovou délkou než  $1100\text{ nm}$ .



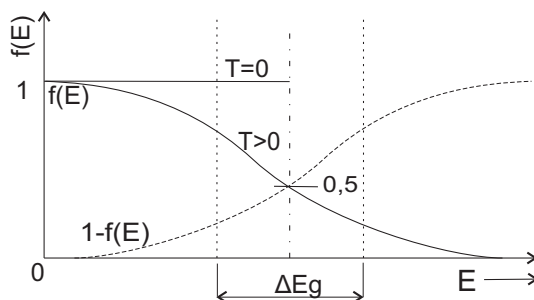
Obr. 2.2: Atomy křemíku ve vlastním polovodiči [12]

Na obrázku 2.3 je znázorněna funkce, která reprezentuje hustotu stavů - počet stavů na jednotkový interval energie u vlastního polovodiče.



Obr. 2.3: Hustota stavů u vlastního polovodiče na jednotkový interval energie[1]

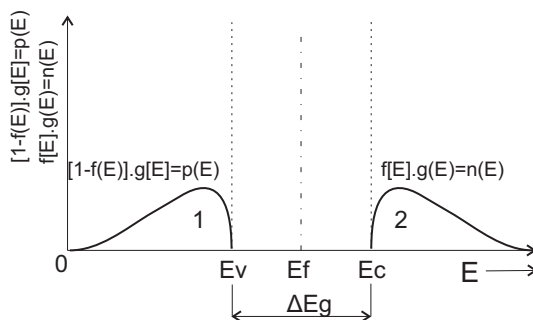
Obrázek 2.4 zobrazuje rozdělovací funkci  $f(E)$ , která udává pravděpodobnost obsazení energetické hladiny elektronem. Pravděpodobnost, že budou obsazeny všechny valenční elektrony je vysoká, oproti pravděpodobnosti, že bude ve vodivostním pásu. To odpovídá výše zmíněné teorii, že valenční pás u vlastního bude za velmi nízkých teplot poslední obsazený a vodivostní pás první neobsazený. Závislost  $1 - f(E)$ , zobrazuje pravděpodobnost neobsazení energetické hladiny elektronem. Obě křivky se protínají v hodnotě 0,5; jež odpovídá hodnotě Fermiho energie, která je u vlastního polovodiče uprostřed zakázaného. Elektrony patří do skupiny částic zvaných fermiony a řídí se Fermi-Diracovou statistikou.



Obr. 2.4: Funkce pravděpodobnosti  $f(E)$  a  $1 - f(E)$ [1]

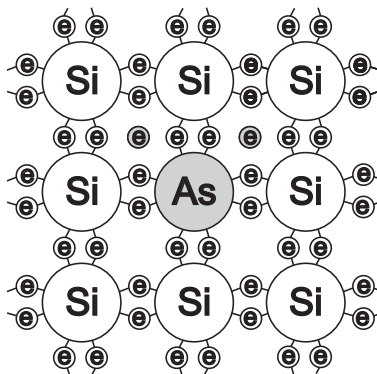
Funkce  $f(E).g(E) = n(E)$  na obrázku 2.5 udává koncentraci elektronů ve vodivostním pásu a funkce  $(1 - f(E)).g(E) = p(E)$  koncentraci děr ve valenčním pásu při nenulové teplotě. Plochy pod těmito křivkami jsou u vlastního polovodiče stejné.

Přidáme-li do krystalu čistého křemíku atom pětimocného prvku (prvek z V. skupiny soustavy prvků), např. fosfor, arsen nebo antimon. Vznikne polovodič typu N. Prvku příměsi, která má o jeden o jeden elektron navíc, říkáme *donor* (dárce -



Obr. 2.5: Koncentrace elektronů a děr u vlastního polovodiče[1]

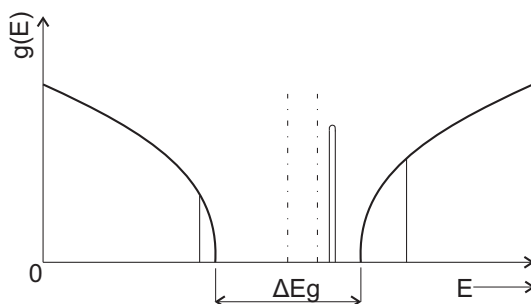
daruje elektron). Čtyři valenční elektrony arsenu utvoří kovalentní vazbu se sousedními atomy křemíku, ale jeden nenajde pro vazbu partnera. Tento elektron je jen slabě přidržován u svého atomu, proto stačí je malá energie k jeho uvolnění. Tyto volné elektrony zprostředkovávají svým pohybem elektronovou vodivost (nevlastní vodivost typu N). Přítomnost atomů takovéto příměsi se projeví v energetickém schématu vznikem lokálních energetických hladin, které leží v zakázaném pásu v blízkosti spodní hranice vodivostního pásu  $E_C$ . Donorových elektronů je v polovodiči mnohem více než vlastních elektronů z křemíku a proto jsou majoritními (většinovými) nosiči náboje. Polovodiči typu N obsahuje též díry, ale ty vznikají jako vlastní nosiče náboje. Jejich množství je silně závislé na teplotě. Tyto díry jsou v polovodiči typu N menšinovými (minoritními) nosiči náboje.



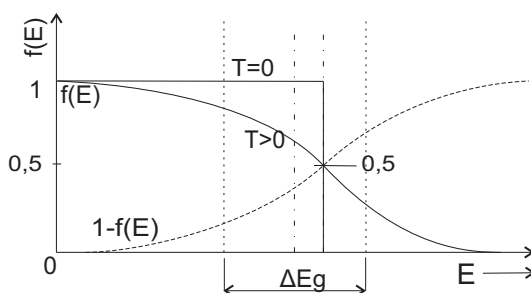
Obr. 2.6: Atomy polovodiče typu N s donorovým atomem As [12]

Na obrázcích 2.7, 2.8, 2.9 jsou zobrazeny obdobné diagramy jako pro vlastní polovodič, ovšem pro polovodič typu N, hladina Fermiho energie  $E_F$  je posunuta směrem k vodivostnímu pásu, hladina donorové energie  $E_D$  leží mezi  $E_F$  a vodivostním pásem. Energie  $\Delta E_D$  potřebná pro přechod z této hladiny do vodivostního pásu

je velice malá, řádově  $\Delta E_D = 0,01 \text{ eV}$ . Například při pokojové teplotě může elektron snadno přejít do vodivostního pásu. Vzhledem k malé hodnotě této energie jsou donorové atomy při pokojové teplotě ionizovány a tvoří kladný prostorový náboj. Koncentrace elektronů ve vodivostním pásu je mnohem vyšší než koncentrace děr ve valenčním pásu. Na obrázku 2.9 je vidět, že plocha 2, která odpovídá koncentraci elektronů je vyšší než plocha 1, jež představuje koncentraci děr.



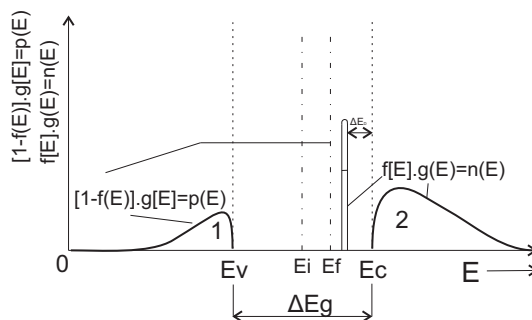
Obr. 2.7: Hustota stavů u polovodiče typu N[1]



Obr. 2.8: Pravděpodobnostní funkce pro polovodič typu N[1]

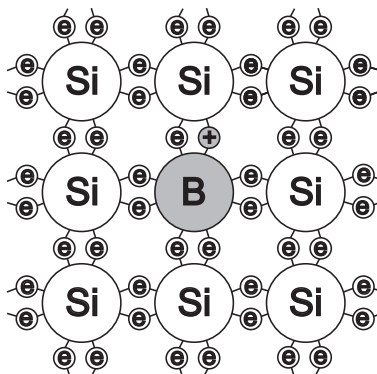
Pokud v krystalu čtyřmocného křemíku nahradíme některé atomy třímocnými atomy prvků z III. skupiny periodické soustavy prvků (např. B, Al, Ga), vznikne polovodič typu P. Atomy příměsi mají o jeden valenční elektron méně než křemík, proto se nazývá akceptorem (příjemcem - přijme do své valenční vrstvy jeden elektron uvolněný teplem). Trojmocný prvek není schopen vytvořit kovalentní vazbu ze čtyř dvojic elektronů. Toto volné místo se chová jako díra (defektní elektron). V důsledku tepelné energie může do nezaplněné vazby přeskočit valenční elektron od sousedního atomu Si a díra se může pohybovat krystalem. Tyto díry cizího atomu způsobují děrovou vodivost polovodiče (nevládní vodivost typu P).





Obr. 2.9: Množství elektronů a děr v polovodiči typu N [1]

Děr, které jsou do polovodiče typu P dodány je mnohem více než děr, které vzniknou ve vlastním polovodiči. Díra je tedy v polovodiči typu P majoritním nosičem náboje. V polovodiči P jsou také i volné elektrony, které vznikají působením teploty a jsou vlastním nosičem náboje a v polovodiči typu P jsou minoritními nosiči náboje. Její množství závisí na teplotě polovodiče.

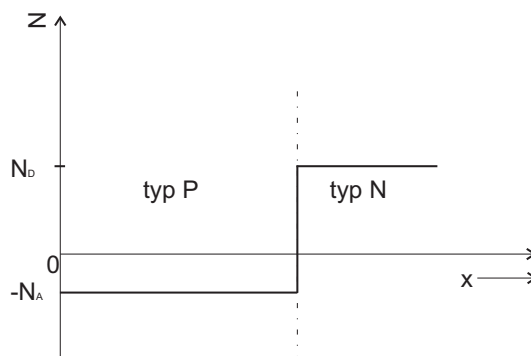


Obr. 2.10: Atomy polovodiče typu P s akceptorovým atomem B [12]

Dodání třímocného prvku (Obr. 2.10) se v energetickém diagramu projeví obdobně, jako u polovodiče typu N. Vznikne akceptorová hladina  $E_A$  v zakázaném pásu, blízko pásu valenčního. K přeskoku elektronu z valenčního pásu do této hladiny stačí jen malá energie  $\Delta E_A$ . Takový atom akceptoru se navenek jeví jako záporně nabitý. Vytvoří se pevný záporný prostorový náboj. Díra, která je tím vygenerována ve valenčním pásu, je volně pohyblivá. V polovodiči typu P je koncentrace volných děr mnohem vyšší než koncentrace volných elektronů, hladina Fermiho energie  $E_F$  je posunuta směrem k valenčnímu pásu.

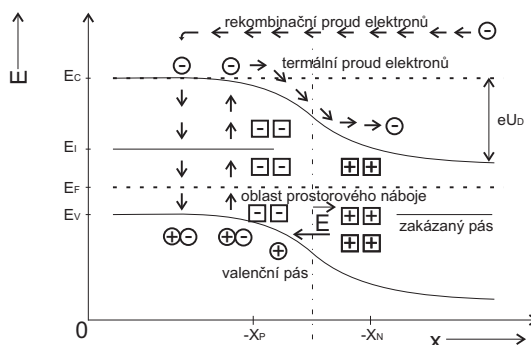
Pokud je jedna část krystalu dopována jedním typem příměsi a druhá část opačným, volné nosiče náboje (elektrony a díry) mají podle zákonitosti difúze unikat z míst vyšší koncentrace do míst, kde je koncentrace nižší. Vytvoří se tak rovnoměrné

rozložení. Po unikajících volných nosičích náboje zůstávají na původních místech pevně vázané nosiče náboje opačné polarity, které vytvoří prostorový náboj. Uvnitř krystalu jsou poměrně silná místní pole, která brání dalšímu unikání příměsí. Celý systém se tak ustálí v rovnovážném stavu a navenek se bude jevit jako elektricky neutrální.



Obr. 2.11: Ostrý přechod mezi oblastí N a P[1]

Příkladem takového rozdílně dopovaného krystalu může být polovodičová dioda obsahující ostrý přechod mezi oblastí P a oblast N. Přes PN přechod tečou proudy volných nosičů náboje oběma směry, na obrázku 2.12 je situace zobrazena pro volné elektrony. Pro díry bude situace obdobná. Některé volné elektrony z části N přejdou do části P a zde rekombinují s volnými děrami (rekombinační proud elektronů). Ovšem jak bylo řečeno, v části P je elektron minoritním nosičem náboje a ten je přitahován do části N, kde je pevně vázaný kladný náboj. Tento proud elektronů se nazývá termální. Bez přiloženého vnějšího napětí jsou oba proudy vyrovnané a na vnějšku se neprojeví.

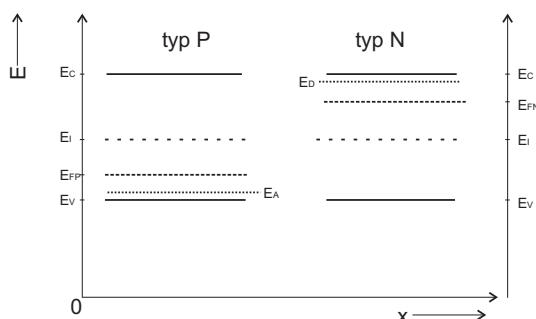


Obr. 2.12: Nepolarizovaný PN přechod[1]

Pokud přiložíme vnější napětí kladným pólom na část P a záporným na část N, dojde k zakřivení pásu a zmenšení vnitřního difúzního napětí  $U_D$ , tím převládne rekombinační proud elektronů z polovodiče typu N do P a děr z P do N. PN přechod je tak polarizován v propustném směru. Při přiložení vnějšího napětí opačné polarizace se zvýší potenciálová bariéra  $U_D$ , sníží se rekombinační proud a převládne termální proud volných nosičů náboje [1] [5].

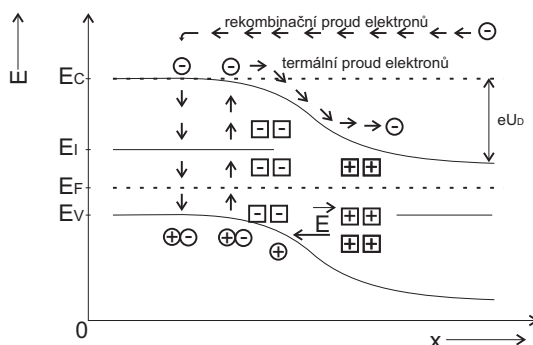
## 2.2 Princip funkce fotovoltaického článku

Fotovoltaický článek si lze představit jako velkoplošný PN přechod orientovaný kolmo k čelní ploše článku mezi přední a zdaní stěnou, přičemž polovodič typu N je orientován k přední stěně a polovodič typu P k zadní stěně článku. Dopadající fotony s energií větší než odpovídá šířce zakázaného pásu  $\Delta E_G$ , generují dvojici elektron-díra. Takto fotony odevzdají svoji energii a pohltí se v PN přechodu. Případný přebytek své energie odevzdají krystalické mřížce, kde se přemění na teplo. Páry elektron-díra jsou v PN přechodu od sebe odděleny vnitřním elektrickým polem. Díry jsou urychleny ve směru a elektrony proti směru vnitřního pole  $\vec{E}$ . Mezi póly článku se objeví elektrické napětí a po připojení článku do obvodu jím začne procházet elektrický proud.



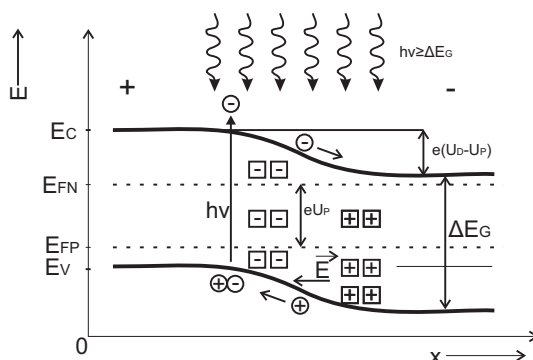
Obr. 2.13: Schéma energetických hladin polovodičového článku[1]

Na obrázku 2.13 je vidět schéma energetických v polovodiči typu P a N. Obrázek 2.14 znázorňuje vyrovnaní Fermiho energie a ohyb pásu u neosvětleného fotovoltaického článku. Jsou zde i rekombinační a termální proudy v rovnovážném stavu. Ve tmě se tedy polovodičový článek chová jako polovodičová dioda.

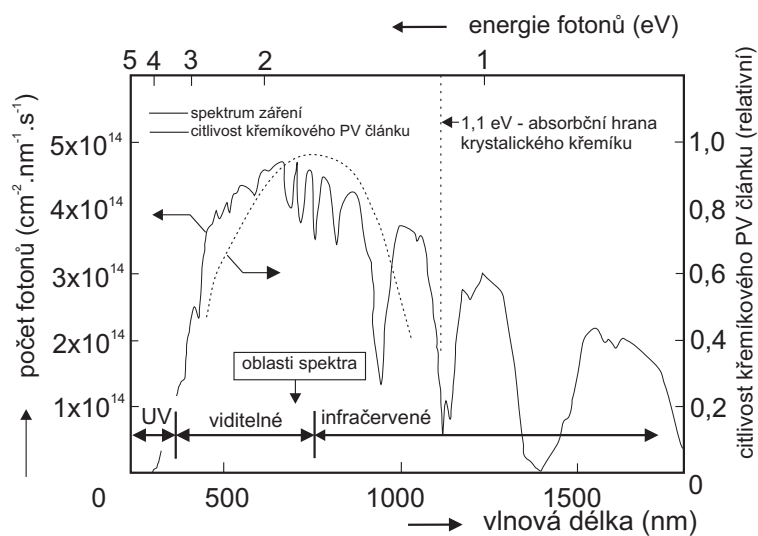


Obr. 2.14: Neosvětlený fotovoltaický článek[1]

Schéma energetických osvětleného polovodičového článku je na obrázku 2.15, článek není zapojen do obvodu. Dopadající elektrony poruší vnitřní rovnováhu nábojů, resp. ustaví jinou. Vygenerované díry jsou urychleny ve směru vnitřního pole  $\vec{E}$  (odpovídá to termálním proudům v závěrném směru). Polovodič typu P se nabíjí kladně a polovodič typu N záporně. Potenciálová bariéra  $U_D$  se sníží, Fermiho hladiny v oblastech P a N se rozdělí a jejich rozdíl odpovídá fotovoltaickému napětí  $U_P$ . Toto napětí může být maximálně  $U_P \approx 0,6 V$ , což odpovídá na původní vyrovnání pásů. Dalším zvyšování intenzity osvětlení článku se toto napětí nezvýší. Snížením potenciálové bariéry o napětí  $U_P$  se totiž zvýší rekombinační proud a systém se tak ocitne v novém ustáleném stavu.



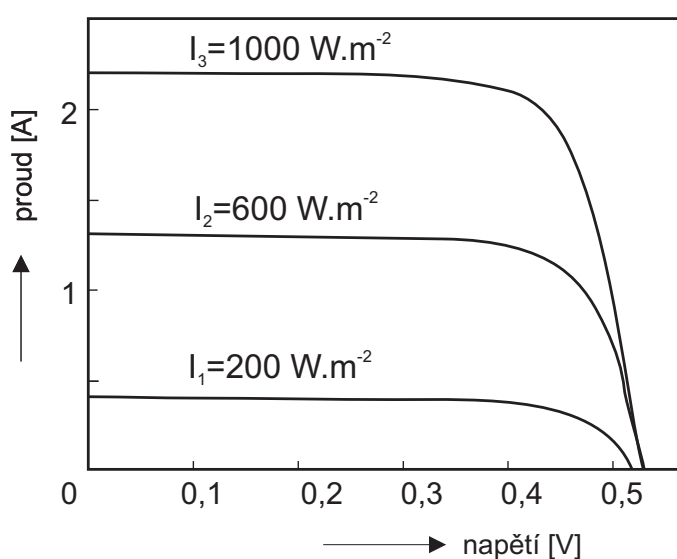
Obr. 2.15: Osvětlený fotovoltaický článek[1]



Obr. 2.16: Spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou, které je schopen fotovoltovoltický článek absorbovat [1]

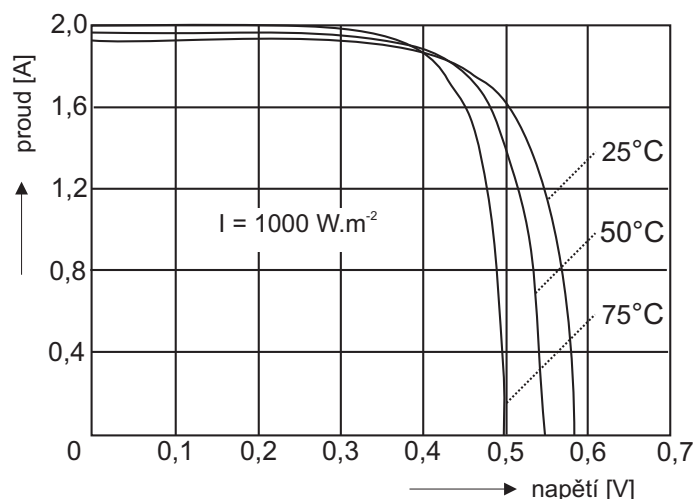
Po zapojení osvětleného polovodičového článku do elektrického obvodu se sníží fotovoltaický napětí (elektromotorické napětí zdroje), změní se zakřivení pásu a potenciálová bariera se opět zvýší. Tím se sníží rekombinační proudy a převládnu termální v důsledku oddělování generovaných volných nosičů náboje vnitřním pevně vázaným prostorovým nábojem. Součet rekombinačních a termálních proudů už tedy nebude nulový a výsledný proud bude protékat připojeným elektrickým obvodem.

Jak bylo výše zmíněno, šířka zakázaného pásu je  $\Delta E_G = 1,1 \text{ eV}$ , fotovoltaické panely jsou tedy citlivé na záření s vlnovými délkami kratších než  $\lambda = 1100 \text{ nm}$ . Na obrázku 2.16 je zobrazeno spektrum slunečního po průchodu atmosférou s vyznačenou oblastí, kterou je schopen křemíkový fotovoltaický článek absorbovat.



Obr. 2.17: Zatěžovací charakteristika fotovoltaického článku pro různé intenzity osvětlení [1]

Na obrázku 2.17 je zobrazena zatěžovací charakteristika osvětleného článku při různé intenzitě osvětlení. Průsečíky křivek se svislou osou udávají proudy nakrátko a napětí naprázdno určují průsečíky s vodorovnou osou. Optimální zátěž pro polovodičový článek má takovou hodnotu, při kterém pracovní bod leží v takovém místě zatěžovací charakteristiky, v němž má součin napětí a proudu nejvyšší hodnotu. Tehdy článek dodává do obvodu maximální výkon.



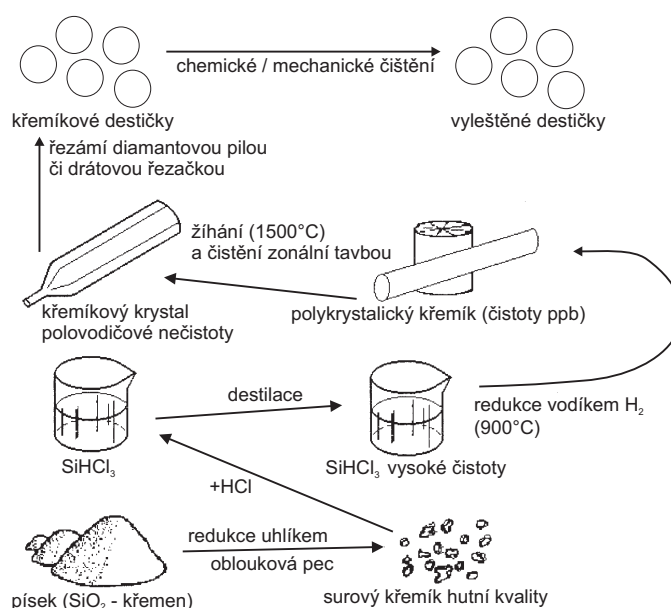
Obr. 2.18: Změna zatěžovací křivky v závislosti na teplotě [1]

Další obrázek 2.18 ukazuje, jak se s teplem mění zatěžovací křivky. Při vyšší teplotě je polovodičový článek schopen dodat vyšší proud nakrátko, ovšem poklesne jeho napětí naprázdno. S rostoucí teplotou a konstantní intenzitou slunečního záření klesá maximální výkon, jenž je článek schopen dodat do obvodu. Klesá tak účinnost fotovoltaické přeměny energie [1].

## 2.3 Výroba fotovoltaických článků

Křemíkové panely patří mezi nejrozšířenější a lze je rozdělit na 3 základní skupiny: monokrystalické, polykrystalické panely a panely na bázi amorfního křemíku. Křemík je na Zemi velice bohatě zastoupený, proto je levný, není jedovatý a je doposud nejvíce používaným a prozkoumaným polovodičem. Křemík rovněž vyhovuje svoji šířkou zakázaného pásu  $\Delta E_G = 1,1 \text{ eV}$ . V přírodě se křemík vyskytuje nejčastěji ve formě křemene nebo křemenného písku ( $\text{SiO}_2$ ). Surový křemík, vhodný pro technologické účely, se vyrábí v obloukových pecích redukcí s uhlíkem  $\text{SiO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{Si} + \text{CO}_2$ . Takto získaný křemík má čistotu zhruba 99%, 1% tvoří nečistoty. Pro použití v polovodičové technice je třeba čistota mnohem vyšší. Jedna z dnes nejpoužívanějších technologií k zvýšení čistoty křemíku je Siemens s chlorovým cyklem (obrázek 2.19).

Chlorový proces, přesto že je nejpoužívanější, je velice technologicky náročný a nebezpečný pro obsluhu i životní prostředí. Nové technologie na výrobu čistého křemíku se vyvíjejí a nyní jsou ve stadiu testování a zkušební výroby. Pokud se osvědčí, mohou snížit energetickou náročnost a cenu čistého křemíku. Na konci výrobního procesu jsou zpravidla hrudky čistého křemíku, ze kterých se dále vytvářejí monokrystalické či polykrystalické ingoty.



Obr. 2.19: Výrobní cyklus křemíku [1]

Výroba polykrystalických ingotů je podstatně jednodušší než monokrystalických. Roztavený materiál se jednoduše nalije do formy a nechá se definovanou rychlostí chladnout. Chladnutí musí být co nejpomalejší, aby se mohly vytvořit co možná největší monokrystalická zrna a v materiálu bylo minimum dislokací. Monokrystalické ingoty se vyrábějí tzv. Czochralskiho metodou. Malý zárodek monokrystalu se ponoří do taveniny o teplotě cca 1415 °C. Zárodek se velmi pomalu otáčí a vytahuje z taveniny. Celý proces tažení probíhá v inertní atmosféře, aby se zaručila čistota křemíku [1].

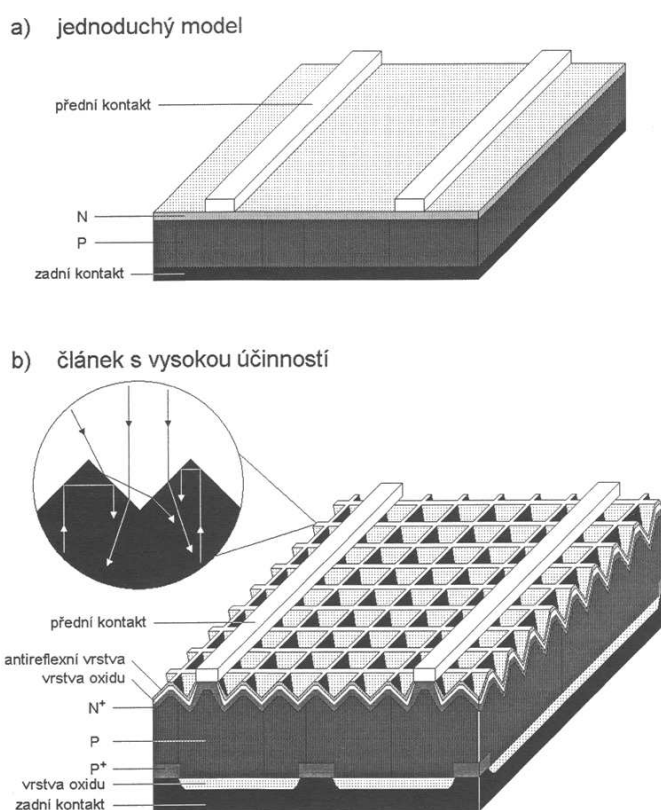
## 2.4 Konstrukce fotovoltaických panelů

Vzniklé monokrystalické či polykrystalické ingoty se řežou na destičky, které tvoří základ polovodičových článků. Destičky se zpravidla řežou na tloušťku 100 μm. Polotovary pro výrobu polovodičů z jiných materiálů se vyrábí podobnými technologiemi jako u křemíku.

Jak bylo řečeno polovodičový článek je velkoplošnou diodou s PN přechodem orientovaným kolmo k čelní ploše. Příměsové prvky se do polovodiče přidávají v difúzních pecích. Na čelní stranu článku se nanáší antireflexní vrstva pro minimalizaci odrazu, s cílem využít maximum dopadajícího záření. Články, které mají nejvyšší účinnost, se tedy jeví jako černé. Někdy se pro dekorální účely na čelní stranu nanáší tenká průhledná vrstva pro zesílení odraženého záření určité vlnové délky v



důsledku interference vln na této vrstvě. Takové články pak v odraženém světle vykazují jistý barevný odstín. Kontakt na čelní straně bývá ve tvaru mřížky či hřebínku aby zakrýval, co možná nejmenší plochu čelní strany článku. Zadní kontakt bývá u standardních panelů celoplošný. Kontakty jsou nanášeny na články sítotiskem. Pouze u náročnějších aplikací se používají vakuové technologie, jako je vakuové napařování. U speciálních článků s vysokou koncentrací záření se realizují kontakty vnořené do materiálu polovodiče. Tím se zvýší styčná plocha mezi kontaktem a polovodičem kvůli vysokým hustotám proudu, které takovými články protékají.



Obr. 2.20: Jednoduchý článek a článek s vysokou účinností [1]

Klasický polovodičový článek je v horní části obrázku 2.20. Tento jednoduchý článek funguje dle výše popsaného principu, ale má nižší účinnost fotovoltaický přeměny z důvodu především rekombinačních ztrát. Pro zvýšení účinnosti slouží u kvalitnějších článků (obrázek 2-20b) konstrukční zdokonalení, které minimalizují ztráty způsobené odrazy. Antireflexní vrstva na jejich povrchu zmenšuje odraz, aby co nejvíce fotonů proniklo do oblasti PN přechodu. Vrstvy nevodivého SiO<sub>2</sub> chemicky deaktivují povrch článku a jen v některých místech jsou vrstvy proleptány a jen zde se odvádí elektrický náboj. Struktura malých jehlanů vyleptána na čelní straně článku způsobuje, že fotony do článku snadno vstoupí, pokud ale projdou PN

přechodem a nepřemění se, odrazí se od zadní elektrody, ale zpět ven čelní stranou díky totální reflexi neproniknou. Fotony se odrážejí zpět k PN přechodu a pravděpodobnost fotovoltaičky přeměny se tak zvyšuje. U oboustranných panelů je taková struktura jehlanů vyleptaná z obou stran, fotony tedy mohou dopadat z obou stran, na zadní stranu například odrazem od země. Množství vyrobené energie je potom vyšší. Fotovoltaička účinnosti přeměny na zadní straně je ovšem nižší, protože fotony kratších vlnových délek jsou pohlceny už v silnější vrstvě substrátu polovodiče a k PN přechodu nedorazí.

U polykrystalů hranice zrn zhoršují transportní vlastnosti polovodiče, u amorfních polovodičů je situace ještě horší. Účinnost dnešních kvalitních monokrystalických článků se pohybuje kolem 20%. V laboratorních podmínkách lze dosáhnout účinnosti až 30%. Účinnost článků na bázi jiných polovodičů (GaAs, InP) je ještě vyšší. Pohybuje se kolem 25% u sériové výroby, avšak jejich cena je několikanásobně vyšší. Proto se tyto články používají především ve vesmírných aplikacích, kde není cena limitujícím faktorem. Tyto články se také používají v tzv. tandemovém uspořádání, kdy články na odlišné bázi jsou umístěny za sebou a každý z nich využívá jinou část spektra. Kromě křemíku se v tenkovrstvých aplikacích používají CuInSe nebo CdTe články nebo články na bázi heteropřechodů mezi různými druhy polovodičů. Tyto články jsou relativně levné, mají ovšem nižší účinnost kolem 10% a mají velmi nestabilní parametry. Lze vyrobit článek s účinností kolem 15%, ale jeho účinnost po krátké době klesne pod 10%.

Fotovoltaičné panely se vyrábějí tak, že se do nich jednotlivé články skládají v sérioparalelní kombinaci, aby při definovaném osvětlení dodávali žádané stejnosměrné napětí a proud. Nejběžnější fotovoltaičný panel se skládá z čelního temperovaného skla, které odolá velkým nárazům a je odolné proti kroupám. Na sklo se pokládá EVA (etylvinylacetát) folie a na ní se vedle sebe skládají jednotlivé propojené články. Přes články se znova položí EVA folie a zadní stěnu článku tvoří zpravidla laminátová kompozice PVF-PET-PVF. Poté se mezi těmito vrstvami vyčerpá vzduch a panel se zahřeje na teplotu tání EVA folie. EVA folie se rozteče jako zalévací hmota zalije prostor mezi čelní a zadní stěnou panelu. Nakonec se panely zarámují a zatmelí silikovým tmelem do hliníkových profilů a opatří se krabicí s výstupními kontakty. Panely jsou tak utěsněny proti vodě a jiným nečistotám. Panely na bázi krystalického křemíku mají životnost 20 až 30 let.

Oboustranné panely jsou složeny z oboustranných polovodičových článků a jsou z hlediska účinnosti fotovoltaičky přeměny výhodnější než používané jednostranné panely. Přitom se jejich cena příliš neliší. Rozdíl ve výrobní technologii oboustranných panelů je pouze ten, že na zadní stěnu je použit průhledný laminát a zadní kontakty nejsou celoplošné, ale jsou realizované formou mřížky, jak je uvedeno výše. Panel je sice optimalizován pro dopad záření z čelní strany, ale účinnost fotovol-

taické přeměny při dopadu ze zadní strany je jen o málo nižší. Oboustranné panely na bázi c-Si jsou v infračervené oblasti spektra pro záření s vlnovou délkou vyšší než  $\lambda = 1100 \text{ nm}$ , tedy s energií menší než odpovídá šířce zakázaného pasu. Toto záření představuje více než 20% energie slunečního záření a úměrně tomu se v oboustranných panelech absorbuje méně energie transformované na teplo ve srovnání s jednostrannými panely. Oboustranné panely mají proto nižší teplotu a s tím související vyšší účinnost fotovoltaický přeměny energie.

Novinkou je propojení monokrystalických kuliček se sférickým PN přechodem. Kuličky mohou být tuhé se skleněnou čelní stěnou nebo pružné, zapouzdřené v plastu s teflonovou čelní stěnou. Kuličky křemíku mají průměr cca 0,6mm, uvnitř je polovodič typu P a na povrchu polovodič typu N. Mají tedy pod povrchem sférický PN přechod. Kuličky se vyrábějí odkapáváním dopované příměsi z kapiláry, která ztuhne během pádu. Poté probíhá difúze a povrch kuličky se předopuje na polovodič typu N. Kuličky jsou pak umístěny na hliníkovou folii s otvory menšími než je průměr kuličky. Folie tvoří zápornou elektrodu, protože se dotýká polovodiče typu N. Na opačné straně kuličky je pak odleptána část N a je zaveden kontakt do polovodiče typu P, který tvoří kladnou elektrodu. Celý článek je následně zapouzdřen a z těchto článků se vyrábějí různě velké tuhé či flexibilní panely. Účinnost u takovýchto panelu se zatím pohybuje kolem 14% [1].

## 2.5 Základní typy fotovoltaických článků

Fotovoltaický článek má za sebou téměř 50 let vývoje a za tuto dobu byla vyvinuta celá řada typů konstrukcí s použitím různých materiálů.

Nejstarší typem jsou fotovoltaické články na bázi monokrystalického křemíku, v nichž je vytvořen velkoplošný PN přechod. Tyto články se vyznačují dobrou účinností, a dlouhodobou stabilitou výkonu. Používají se stále pro velkoplošné instalace. Jejich nevýhodou je ovšem velká spotřeba velmi čistého křemíku a poměrně náročná výroba.

Velká spotřeba křemíku a jeho náročnost výroby vedla k používání tenkovrstvých článků. Mezi nejběžnější patří články z monokrystalického, polykrystalického či amorfního křemíku. Jejich hlavní nevýhodou je znatelně menší účinnost a menší stabilita parametrů (účinnost s časem dále klesá). Tyto články se začínají prosazovat v takových aplikacích, kde je zapotřebí ohebnost. Hlavně díky zájmu armády se vyvíjí články, které jsou součástí oblečení nebo batohu a umožňují napájet přenosná zařízení.

Existují systémy, které používají k separaci nábojů, jiné metody než PN přechod a často to ani nejsou polovodiče. Patří sem například fotoelektrické (fotogalvanické)

články, polymerní články. Začínají se používat nanostruktury ve formě uhlíkových nanotrubiček nebo nanotyčinek, či nanosení kvantových teček na vhodnou podložku. U těchto struktur lze snadno ovlivňovat jejich elektrické a optické vlastnosti. Tyto články se však v praxi zatím téměř vůbec neuplatňují. Problémem je opět jejich nízká účinnost, malá stabilita vlastností a životnost. Asi nejbližší komerčnímu využití jsou flexibilní fotovoltaické moduly na bázi organických polymerů.

Největší vyhlídky představují složené kompozitní fotovoltaické články, které jsou schopné efektivně využívat širokou část slunečního spektra. Každá vrstva dokáže využít světlo pouze v určitém rozsahu vlnových délek. Záření, které není schopna využít propustí do dalších vrstev, kde je využito [1].

### **2.5.1 Křemíkové monokrystalické články**

Články z monokrystalického křemíku patří mezi nejstarší. Destičky na výrobu článku se řezou z ingotu monokrystalického křemíku. Jak bylo výše zmíněno Czochralského metoda je velice náročná a nákladná, proto se hledali jiné způsoby výroby monokrystalu křemíku. Jednou z možností je táhnout z taveniny tenký monokrystalický pásek, který se na solární články rozřeže snadněji a ze stejného množství křemíku se dá vyrobit dvojnásobná plocha fotovoltaických článků. Účinnost toho článku je však o něco nižší než u článků řezaných z ingotu monokrystalického křemíku [3].

### **2.5.2 Články z polykrystalického křemíku**

Články se vyrábějí odléváním čistého křemíku do vhodných forem, a následným řezáním vzniklých ingotů na tenké plátky. Odlévání je podstatně jednodušší než tažení monokrystalu křemíku. Lze také vyrobit články ve tvaru obdélníku či čtverce (lepší využití materiálu a plochy panelu). Polykrystalické články mají nižší účinnost, protože na styku krystalových zrn je vyšší odpor [3].

### **2.5.3 Články z amorfního křemíku**

Tyto články mají oproti výše popsaným typům výhodu, že spotřebují při výrobě podstatně méně křemíku a jsou tedy ve velkosériové výrobě znatelně levnější. Proces výroby je založen na rozkladu křemíku ve vodíkové atmosféře a jeho nanosení na skleněné, nerezové či plastové podložky. Takto nanesená tenká vrstva je amorfní, tj. nemá pravidelnou krystalickou strukturu a obsahuje určité množství vodíku. Díky větší absorpci slunečního záření může být vrstva křemíku podstatně tenčí. Lze tedy připravovat velmi tenké a ohebné články.

Tento materiál má však oproti krystalickému křemíku daleko méně pravidelnou strukturu s velkým množstvím poruch. Některé atomy nemají kolem sebe potřebné

sousedy pro vytvoření vazby a zůstávají na nich tzv. visící vazby. Na těchto poruchách může docházet k rekombinaci nábojů a tím se snižuje proud a účinnost článku. Částečně se tento problém odstraní navázáním již přítomného vodíku na tyto vazby. Vodík způsobuje nestabilitu celého systému a struktura je narušována oxidací vzdušným kyslíkem. Výkon těchto článků proto zpočátku klesá a po nějakém čase se ustálí asi na 80% původní hodnoty.

U tohoto typu článku se setkáme s modifikovaným PN přechodem, kdy mezi polovodičem P a N je vrstva nedopovaného polovodiče, v níž dochází k pohlcení většiny dopadajícího záření. Vnitřní elektrické pole zasahuje do této vrstvy a dochází k okamžitému oddělení elektronů a děr a tím se snižuje možnost jejich rekombinace. Účinnost amorfních článků je asi 7%. Větší účinnosti lze dosáhnout použitím vícevrstevných struktur [3].

## **2.6 Další možnosti vývoje fotovoltaických článků**

### **2.6.1 Galiumarsenid (GaAs)**

Galiumarsenidové články jsou tenkovrstvé články, které se dají vyrobit s různými vlastnostmi a tedy optimálně přizpůsobit potřebám. Lze měnit poměr Ga a As a používají se další doplňující prvky (Al, P, Sb, In). GaAs články mají vysokou absorpci záření, proto mohou být tenčí - stačí tloušťka několik mikrometrů, k tomu aby zachytily téměř všechno dopadající záření. Jsou také méně citlivé na vyšší teploty než křemíkové články, proto je lze použít v koncentrátorových systémech. Jejich účinnost je díky tomu vyšší. GaAs články většinou slouží k realizaci vícepřechodových článků. Jejich nevýhodou je, že galium je velice vzácný kov a arsen je velice jedovatý [3].

### **2.6.2 Diselenid mědi a india (CuInSe<sub>2</sub>, CIS)**

Vyznačují se vysokou absorpcí slunečního záření, a proto mohou být velice tenké (99% záření se pohltí v jednom mikrometru tloušťky). V laboratořích dosahují poměrně vysoké účinnosti (kolem 18%) [3].

### **2.6.3 Telurid kadmia (CdTe)**

Tento materiál má téměř ideální vlastnosti co se týče vzdálenosti valenčního a vodivostního pásu (1,44eV) a velkou absorpční schopnost. Podobně jako technologie CIS je lze vyrábět nízkonákladovými technologiemi [3].

## 2.6.4 Články využívající organické látky

Od těchto článků si především slibujeme nízkou cenu, pružnost a ohebnost. Na zkoumání vlastností organických polovodičů se vytvořil celý vědní obor. Avšak jde o vědní disciplínu velice nepřehlednou, i když v organických polovodičích je skryt velký potenciál nejen pro získávání energie.

V současné době se používají fotogalvanické články s organickým barvivem (někdy se nazývají Graetzelovi). Použitím vysoce jemného  $TiO_2$  (oxid titaničitý) lze vytvořit články s rozumnou účinností. Článek se skládá z vrstvy vysoce jemného oxidu titaničitého, který je nasáknutý vodním roztokem elektrolytu obsahující redox (dvojici např. jód/jodid) a vhodné barvivo (organický komplex ruthenia). Foton je zachycen v barvivu a to vytvoří excitovaný stav a elektron je přenesen do  $TiO_2$  (barvivo se tak ocitne v oxidovaném stavu). Elektron projde skrz vrstvu  $TiO_2$  na průhlednou elektrodu je odveden do vnějšího obvodu. Obvod je uzavřen, tak že elektron vstupující z vnějšího obvodu je přenesen na jód, tím se vytvoří trijodidový anion a ten redukuje oxidovanou formu barviva a to je připraveno pro další přijetí fotonu.

Výhodou těchto článků jsou menší nároky na čistotu použitých materiálů. Ovšem zásadní nevýhodou jsou potíže s kapalným a korozivním elektrolytem, který musí být dokonale izolován, dále barvivo musí být dostatečně stabilní a vydržet dlouhou dobu slunečního svitu. V nedávné době bylo dosaženo účinnosti 7,3% [3].

## 2.6.5 Nanostrukturní články

V současné je již technologicky možné připravit dostatečně malé nanostruktury. V těchto strukturách je možné nastavovat potřebnou šířku zakázaného pásu. Nanostruktury lze nanášet na povrch vhodného substrátu naléváním suspenze v odstředivce. Dosahované účinnosti takovýchto článků jsou zatím velmi nízké, asi kolem 3% [3].

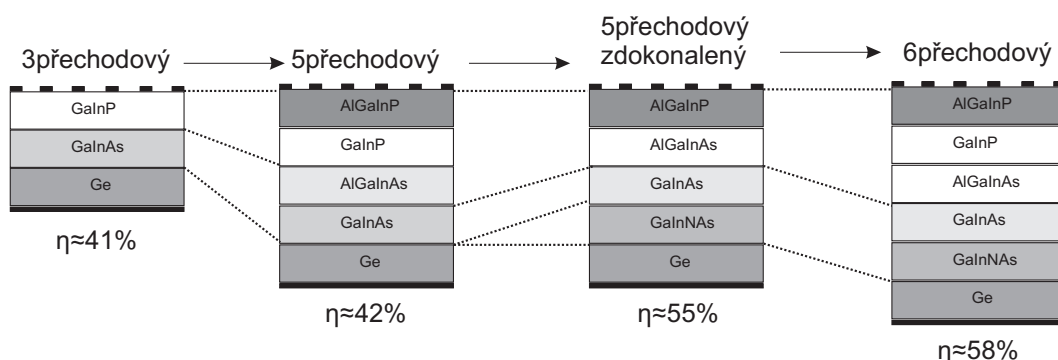
## 2.6.6 Fotogalvanické články z vodivých polymerů

Tyto články fungují na podobném principu jako fotovoltaiické články s PN přechodem. Ve směsi vodivých polymerních molekul, z nichž jeden má elektronakceptorové a druhý elektron donorové vlastnosti, dojde k pohlcení fotonu a ke vzniku vázaného páru elektron-díra a za určitých okolností dojde k přenosu náboje na elektron akceptorovou molekulu. Jako akceptor elektronů se používá uhlíková nanotrubička.

Problémy jsou zatím s účinností, protože pohyblivost elektronů je horší než v anorganických polovodičích, a je tedy větší šance k rekombinaci nábojů [3].

## 2.6.7 Vícepřechodové články

Účinnost jednopřechodového fotovoltaického článku závisí na tom, jakou část slunečního spektra dokáže využít a dále na tom jakou část energie fotonu dokáže přeměnit na elektrický proud a jakou na teplo. Pokud je zakázaný pás úzký, článek dokáže využít širší část spektra, ale za cenu menšího napětí a tedy u účinnosti. Článek se širokým zakázaným pásem má sice větší napětí, ale nedokáže využít všechny fotony. Existuje tedy optimální šíře zakázaného pásu, při které má fotovoltaický článek nejvyšší účinnost. Křemíkové monokrystalické články jsou velmi blízko tohoto optima a články z *GaAs* jsou zase ideální pro použití mimo zemskou atmosféru.



Obr. 2.21: Diagram vývoje vícepřechodových článků [3]

Vytvoříme-li ale vícevrstvou strukturu, jejíž každá část bude optimalizovaná pro určitou část slunečního spektra, potom bude možné dosáhnout podstatně lepšího využití energie dopadajícího záření. Vícevrstvá vrstva sice redukuje procházející proud, ale to je kompenzováno vyšším napětím článku.

Výhodu těchto struktur je lepší využití energie slunečního záření a tedy i vyšší účinnost. Sluneční záření obsahuje fotony různých vlnových délek. Jednovrstvou strukturou projdou fotony s menší energií než je šíře zakázaného pásma bez zachycení, u fotonů s energií vyšší se využije jen její část a zbytek se přemění na teplo. Vytvořením vícevrstvé struktury, kde každá vrstva využívá jinou část slunečního spektra, můžeme docílit podstatně vyšší účinnosti fotovoltaické přeměny energie. Teoreticky se takto dá využít celé sluneční spektrum.

V praxi se používají články, které ve vrchní vrstvě zachycují fotony s vyšší energií a ty s nižší se zachycují až v nižších vrstvách. Jako materiál se používají prvky III. skupiny a V. skupiny, např. *InP*, *GaSb*, *GaAs*. Optimálním naladěním šířek zakázaných pásu jednotlivých vrstev, lze článek vyladit, aby optimálně využil co možná největší část spektra záření. V současné době se používají články o třech

vrstvách, pracuje se však již na šestivrstvém článku (obrázek 2.21), u kterého se předpokládá účinnost až 58%.

Vícevrstvé jsou podstatně dražší než klasické křemíkové články, proto se často používají s vhodným koncentrátorovým systémem, který umožní snížit plochu článků [3].



## 3 VYUŽITÍ SYSTÉMŮ GRID-OFF PRO NAPÁJENÍ ZAŘÍZENÍ

Fotovoltaické systémy se zpravidla dělí do dvou hlavní kategorií:

- Systémy GRID - ON jsou připojeny k elektrické rozvodné síti a dodávají do ní elektrickou energii. V češtině se jim obvykle říká "síťové systémy".
- Systémy bez připojení na elektrickou rozvodnou síť, tzv. "autonomní systémy", v angličtině GRID-OFF. Ty lze dále rozdělit podle funkce a uspořádání.

### 3.1 Systémy GRID-ON

Použití systémů GRID-ON, tedy systémů do připojených do elektrické rozvodné sítě může mít ekonomické i ekologické výhody. Tyto systémy umožňují zákazníkovi zvolit způsob napájení jeho spotřebičů. Ve dne, nebo za slunečných dní je možné energetickou potřebu pokrýt z fotovoltaického systému a v noci nebo za nepříznivých slunečních podmínek je možné využít energie dodávané elektrickou rozvodnou sítí. Fotovoltaický systém může pokrývat spotřebu pouze části zařízení, které se například starají o chod budovy nebo dodávat energii do elektrické rozvodné. Tento způsob je zvláště výhodný v zemích, kde je takto vyrobena elektrická energie "tzv. zelená energie" vykupována za výhodné ceny, které umožňují brzkou návratnost investic do fotovoltaického systému.[5].

### 3.2 Autonomní solární systém bez akumulátoru

Autonomní fotovoltaický (FV) systém bez akumulace nachází využití především na místech kde není dostupná elektrická rozvodná síť, ať už kvůli odlehlosti místa, možné nespolehlivosti dodávky nebo by bylo zbudování elektrické přípojky příliš nákladné. Autonomní FV systémy se ve většině případů používají s nízkoodběrovými a úspornými spotřebiči.

Typickými místy použití těchto systémů jsou například horké odlehlé plany s velkým počtem slunečných dní v roce. FV systém se zde používá například k napájení čerpacího zařízení pro zavlažování polí nebo k zajištění napájecí vody pro dobytek. Případně se dá energie vyrobená FV systémem využít k chlazení budov. Většina těchto systémů vyrábí stejnosměrný proud pro jednoduchost připojení jakéhokoliv spotřebiče.

Jednoduchost těchto zařízení je činí ideální pro instalace v těchto náročných podmínkách. Nepotřebují složité řídicí jednotky nebo komplexní elektroinstalace.

Solární systémy s výkonem do 500W a váží méně než 70 kg, lze realizovat jako přenosné pro jednoduchou přepravu a instalaci v místě potřeby. Ačkoli pumpy a ventilátory vyžadují pravidelnou údržbu, FV jednotky požadují jen příležitostnou kontrolu a vyčištění povrchu.[6].

### 3.3 Autonomní solární systém s akumulátorem

FV systém s akumulací elektrické energie se uplatňuje na podobných místech jako systémy bez akumulace, tedy na místech kde je nedostupná elektrická rozvodná síť nebo je její zbudovaná příliš drahé. Schopnost akumulovat vyrobenou elektrickou energii, dělá z fotovoltaického systému spolehlivý zdroj elektrické energie pro stálé použití.[7].

FV systém s akumulací elektrické energie může být konstruován pro napájení stejnosměrným nebo střídavým proudem. Pro použití obvyklých elektrických spotřebičů vyžadujících střídavý proud se mezi baterii a spotřebič zařadí střídač, který rozstřídá stejnosměrný proud. To sice znamená ztrátu malého množství energie, která se spotřebuje na přeměnu, ale umožní používat konvenční elektrické spotřebiče.

FV systém je připojen k baterii a ta je v případě sepnuté zátěže připojena na zátěž. Během dne fotovoltaický panel dobíjí baterii, případně napájí zátěž, je-li připojena. Regulátor dobíjení udržuje baterii ve správném provozním stavu - brání jejímu přebíjení nebo hlubokému vybití.

Baterie umožňuje pracovat (napájet zařízení) FV systému i ve chvílích když nejsou vhodné světelné podmínky. Baterie používané ve spojení s FV systémem jsou podobné těm, které se používají v automobilech, ovšem jsou konstruovány pro akumulování většího množství elektrické energie a pro každodenní nabíjení a vybíjení. Jsou na ně kladeny vysoké nároky na údržbu a proto zde nevyhoví bezúdržbové akumulátory. U akumulátorů ve FV systémech potřebujeme pravidelně kontrolovat hladinu elektrolytu a bránit jeho promrznutí.[7].

### 3.4 Hybridní solární systém

Hybridní systém spojuje několik výrobních a akumulačních systémů elektrické energie k tomu aby umožnil kontinuální dodávku elektřiny pro vzdálený spotřebič, vzdálené usedlosti, farmy nebo celé osady (např. polární stanice). Fotovoltaický systém je doplněn, diesel generátorem, větrnou elektrárnou nebo malou vodní elektrárnou či jiným zdrojem elektrické energie. Tyto systémy dohromady musí vyhovět požadavkům na napájení zařízení.

Před návrhem takového systému je nutné znát specifika odběru elektrické energie a lokální dostupné zdroje. Je tedy nutné dlouhodobě sledovat lokální podmínky pro optimální návrh takového zařízení.[8].

## 4 FOTOVOLTAIKA A EVROPSKÁ UNIE

### 4.1 Současná situace

Evropská unie (dále EU) se problematice využití obnovitelných zdrojů věnuje již delší dobu. Většina členských zemí EU se již v Kjotském protokolu zavázala snížit emise skleníkových plynů. V rámci EU se oblastí fotovoltaiky (dále FV) zabývá Poradní rada pro výzkum fotovoltaických technologií (dále PV-TRAC). V roce 2005 vydala rada dokument "Vize pro fotovoltaické technologie" (A Vision for Photovoltaic technology), který shrnuje současnou situaci v EU a ve světě, nastiňuje budoucnost FV technologií a identifikuje nástroje, které mají pomoci této budoucnosti dosáhnout[10].

#### 4.1.1 Evropská politika a fotovoltaika

Na evropské úrovni bylo přijato několik dokumentů, které upravují a sjednocují politiku rozvoje obnovitelných zdrojů obecně, či konkrétně FV technologií.

- Bílá kniha "Energie pro budoucnost - obnovitelné zdroje energie" (White Paper for a Community Strategy and Action Plan) - vydána v listopadu 1997, vytyčuje cíl mít instalovaný výkon 3GW ve fotovoltaických technologiích v roce 2010.
- Zelená kniha "Green Paper Towards a European Strategy for the Security of Energy Supply" - stanovuje cíl zdvojnásobit podíl obnovitelných zdrojů z 6% v roce 1996 na 12% v roce 2010.
- Direktiva "Directive on Electricity Production from Renewable Energy Sources (RES-e)" - předmětem této direktivy je zvýšit podíl zelené elektrické energie ze 14% na 22% v roce 2010.

Cíle, které mají být touto evropskou politikou dosaženy:

- zvýšení různorodosti a bezpečnosti zdrojů elektrické energie
- snížení důsledků klimatických změn
- přispět k udržitelnému ekonomickému růstu světové ekonomiky a rozvojových zemí

V souladu s Kjotským protokolem, Evropská komise zřídila Akční program klimatických změn, jež má zajistit celou řadu měření, jejichž výsledky mohou být později zahrnuty do řady legislativních norem. Evropskou energetickou politikou se

zabývá celá řada dokumentů a podávat jejich seznam a vysvětlovat jejich význam jistě není předmětem této práce.

Ještě v době, kdy unii tvořilo jen 15 členských států byl vydán dokument, který říká, že v roce 2010 by se mělo 22% elektrické energie z obnovitelných zdrojů (viz. výše zmíněná Direktiva). To sice nejspíš dodrženo nebude, ale je vidět, že si v tomto směru klade unie vysoké cíle. Později byl tento dokument upraven na 21% pro 25 evropských zemí[10].

#### **4.1.2 Národní politiky zemí EU a fotovoltaika**

Přes snahu EU sjednotit, harmonizovat a zefektivnit veškeré činnosti na poli obnovitelných zdrojů energie, je situace stále velice různorodá a nepřehledná. Existují velké rozdíly mezi členskými státy a jejich časovým harmonogramem a systémem podpory. Přestože je různorodost Evropě vlastní, tato nejednotnost dává špatný signál investorům a zájemcům o obnovitelné zdroje. Proto jsou snahy EU na místě.

Výzkumné činnosti spojené s FV technologiemi jsou v Evropě podporovány samotnou unií a rovněž národními programy. Výzkumné aktivity na národní úrovni jsou v současné době vedeny ve 2. rozdílných rovinách:

- pro většinu členských států je podpora FV technologie součástí programu na podporu obnovitelných zdrojů. V zemích jako je Rakousko nebo Dánsko, FV reprezentuje pouze malou část ve výzkumu obnovitelných zdrojů energie. V jiných zemích, jako je Švédsko, Švýcarsko nebo Francie je FV naopak prioritní oblastí, které se věnuje velká pozornost.
- ve zbývajících členských zemích je výzkum FV technologií zařazen v obecných programech technologického rozvoje. V Řecku je FV výzkumný program zařazen do "Programu pro propagaci průmyslového výzkumu" ("The programme for the promotion of industrial research") nebo do "Programu pro demonstrační projekty" ("The Programme for Demonstration projects"). Toto je rovněž případ Portugalska, kde jsou výzkumné aktivity na poli FV sdruženy do "Nadace pro vědu a technologie", nebo do investičních programů Ministerstva financí.

Státní orgány jsou obvykle hlavními institucemi zapojené do FV výzkumu probíhajícího na národní úrovni. Mnoho z těchto výzkumných projektů je spolufinancováno z evropských rámcových programů.

V některých členských státech a regionech byly zavedeny speciální výkupní tarify, tzv. "feed-in tariffs", které mají povzbudit rozvoj a instalace FV systémů. V Německu, kde "Renewable Energy Sources Act" nastavuje ambiciózní cíl dosáhnout

1GW instalovaného výkonu v obnovitelných zdrojích v roce 2010. To mělo za následek desetinásobný nárůst trhu (z 13MW v roce 199 na 130MW v roce 2003) a 20% snížení cen. Španělsko rovněž zavedlo zvýhodněný tarif, ale administrativní překážky stále brání výraznějšímu nárůstu. Flanderský region v Belgii zavedl v roce 2006 podobné tarify jako jsou v Německu. Ačkoliv podpůrné programy a zvýhodněné výkupní ceny "zelené" elektrické energie vyrobené ve FV systémech mohou znamenat prudký nárůst zájmu investoru o tyto technologie, je třeba zajistit aby nebyly znevýhodněny ostatní technologie a provozovatelé ostatních zdrojů elektrické energie[10].

### 4.1.3 Situace v České republice

Mezi novými členskými státy je jednoznačným favoritem ČR, která v době svého vstupu do EU v květnu 2004 disponovala instalovaným výkonem ve FV 300kW, což představovalo téměř 50% instalovaného výkonu v nově přistupujících státech[10].

Česká republika se zavázala dosáhnout 8% podílu obnovitelných zdrojů na hrubé výrobě elektrické energie k roku 2010. Společně s tím také vytvořit legislativní a tržní podmínky pro udržení důvěry investorů v technologie na bázi obnovitelných zdrojů. Tak to je uvedeno ve Směrnici 2001/77/ES, kterou ČR zahrnula do svého právního řádu v Zákonu č. 180/2005 Sb. Směrnice ovšem už nedefinuje jakými prostředky má být tohoto cíle dosaženo, to ponechává na členských státech. Česká republika se rozhodla zavést systém výhodných výkupních cen (tzv. feed-in tariff) v kombinaci s mechanismem zelených bonusů. Tento systém se z pohledu FV a jejího rozvoje osvědčil jak v EU (viz tabulka A.1), tak i na celém světě. Tento systém je v Evropě dominantní a další země ho nadále zavádějí nebo upravují. Vedle feed-in tarifů existují i jiné systémy podpory FV technologií, které je však mnohdy jen vhodně doplňují[11].

#### Princip výkupních cen

Pro provozovatele přenosové sítě vyplývá ze zákona č. 180/2005 Sb. povinnost připojit do distribuční soustavy FV systém a veškerou vyrobenou elektřinu (na, kterou se vztahuje podpora) vykoupit. Výkup probíhá za cenu, která byla pro daný rok stanovena Energetickým regulačním úřadem (dále ERÚ) v konkrétním Cenovém rozhodnutí. Tato cena bude po následujících 15 let vyplácena jako minimální. Bude pouze navýšena o index PPI (tzv. Cenový index průmyslové výroby, nebo-li průmyslová inflace). Investor je povinen v půlročním intervalu podávat hlášení o naměřené výrobě[11].

## Princip zelených bonusů

Zeleným bonusem se rozumí částka, o kterou bude navýšena tržní cena elektřiny. Tato částka zohledňuje snížení poškození životního prostředí využitím obnovitelného zdroje. Tento systém využívají investoři, kteří vyrobenou elektřinu využívají pro vlastní spotřebu.

Výrobce (provozovatel obnovitelného zdroje) musí najít na trhu distributora, kterému elektřinu prodá za tržní cenu. Cena je nižší než u konvenčně vyrobené elektřiny, protože obsahuje nestabilitu dodávky z obnovitelného zdroje, a je různá pro různé typy obnovitelných zdrojů. V okamžiku prodeje elektřiny získá výrobce od provozovatele tzv. zelený bonus. ERÚ stanoví výši bonusu tak, aby výrobce získal za jednotku vyrobené o něco vyšší částku než je v systému pevných výkupních cen[11].

## Dotační systém v ČR

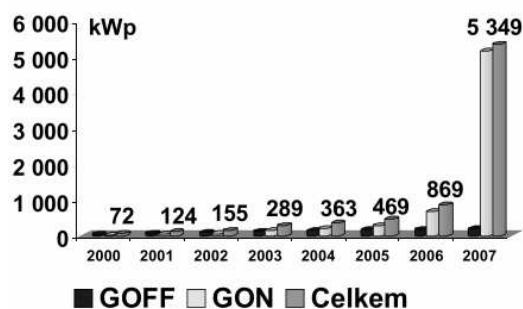
Energetická koncepce České republiky předpokládá využívání všech zdrojů energie, jejichž používání přispěje k posilování energetické nezávislosti země na cizích zdrojích energie a posilování ochrany životního prostředí. Preferovány budou všechny typy obnovitelných zdrojů včetně fotovoltaiky. Dotace lze získat jednak z prostředků státního rozpočtu v rámci národních dotačních programů a také v rámci Operačních programů (prostředky Strukturálních fondů Evropské unie).

Národní program na podporu úspor energie a využití obnovitelných zdrojů pro rok 2007 je rozdělen na dvě části. Jedna část spadá pod Ministerstvo průmyslu a obchodu (MPO) a druhá pod Ministerstvo životního prostředí (MŽP). Jedná se o roční program s omezeným rozpočtem a na dotaci se nevztahuje žádný právní nárok. Dotaci z tohoto fondu lze získat až po uvedení zařízení do provozu. V roce 2007 šlo získat dotaci pouze od MŽP (resp. od Státního fondu životního prostředí). Podporu mohla získat pouze fyzická osoba se systémem do 5 kWp.

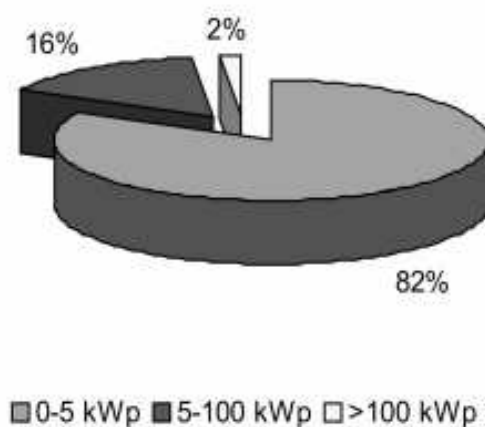
Operační programy Evropské unie jsou systémy, kterými jsou redistribuovány prostředky z rozpočtu EU do rozpočtů členských států. Pro oblast fotovoltaických systémů je důležitý Operační program OPPI (Operační program podnikání a inovace) a OPŽP (Operační program Životního prostředí). V rámci těchto programů by měla podpora směřovat především k podnikatelským subjektům, které by mohly získat až 30% dotaci. MŽP resp. Státní fond životního prostředí zastřešují programy v rámci priority č. 3 OPŽP. O výši podpory pak rozhoduje finanční a ekonomická analýza projektu[11].

## Instalovaný výkon v roce 2007

Podle provedeného výzkumu Českou agenturou pro obnovitelné zdroje (Czech RE Agency) by na konci roku 2007 měl instalovaný výkon dosáhnout 5,3 MWp, přičemž koncem října 2007 se instalovaný výkon pohyboval kolem 3,8 MWp. Z informací, které pro tento výzkum poskytl Energetický regulační úřad (ERÚ), bylo uděleno 177 licencí pro výrobu elektřiny z FV o celkovém výkonu 2,92 MWp.



Obr. 4.1: Vývoj instalovaného výkonu v ČR[9]



Obr. 4.2: Struktura instalovaného výkonu [9]

Z grafů na obrázcích 4.1 a 4.2 je patrné, že se v posledním roce zvýšil počet malých soukromých instalací do 5 kWp, které jsou umístěny například na střechách rodinných domů. Podíl systémů GRID-OFF se také zvolna zvyšuje, nebyl zde zaznamenán takový skok jako v případě GRID-ON systémů. Je to způsobeno především tím, že zbudování systém GRID-OFF je motivováno jinými účely, než je tomu u



systemu GRID-ON. Z tabulky 4.1 je patrné rozložení licencí k provozování fotovoltaických systémů v České republice. Nejvíce licencí bylo vydáno v Plzeňském (53) a Jihomoravském kraji (18)[9].

Tab. 4.1: Rozdělení licencí k provozování FV systémů v ČR podle krajů [9]

Kraj	Instalace
Jihočeský	11
Jihomoravský	18
Karlovarský	3
Královehradecký	4
Liberecký	7
Moravskoslezský	8
Olomoucký	16
Pardubický	9
Praha	8
Plzeňský	53
Středočeský	12
Ústecký	10
Vysočina	2
Zlínský	16

## 5 VYUŽITÍ FOTOVOLTAICKÝCH SYSTÉMŮ V BRNĚ

### 5.1 Lokální podmínky

Pro stanovení lokálních podmínek bude použito údajů získaných z Fotovoltaického geografického informačního systému (dále PVGIS). Dále se bude vycházet z dat získaných z měření Českého hydrometeorologického ústavu [15].

Sluneční podmínky v Brně jsou v republikovém kontextu velice dobré. Jak je patrné z map uvedených v příloze (Obrázky B.1, B.2, B.3) roční průměrný úhrn slunečního záření zde dosahuje  $1075 - 1300 \text{ kWh/m}^2$  (dle různých zdrojů[14][15]), roční průměrná doba slunečního záření je 1673 - 1730 hodin a průměrný počet bezoblačných dnů je 51 - 56 v roce. Jižní Morava, potažmo Brno je tedy vhodné pro umístění různých fotovoltaických aplikací.

Pro výpočet fotovoltaických aplikací využitých v městských aglomeracích bude použita zeměpisná poloha o souřadnicích  $49^{\circ}11'26.661''\text{N}$ ,  $16^{\circ}36'45.152''\text{E}$ , to odpovídá Hlavnímu železničnímu nádraží, jakožto jednomu z nejdůležitějších dopravních uzlů v Brně.

Nejdůležitější pro výpočet fotovoltaických aplikací, budou data získaná prostřednictvím PVGIS. Data vycházejí z dlouhodobých měření a proti letošním hodnotám se budou lišit pravděpodobně jen o 10%. PVGIS umožňuje po zadání zeměpisných souřadnic místa spočítat a zobrazit denní, měsíční a roční hodnoty slunečního svitu, optimálního natočení fotovoltaického panelu, průměrné denní teploty a hodnotu indexu HDD (Heating degree day). Dále je zde možné po zadání jmenovitého výkonu fotovoltaického panelu, získat hodnoty o průměrné denní a měsíční produkci elektrické energie, kterou by byl zadaný panel v daném místě schopen vykonat. Rovněž systém určí optimální sklon a natočení fotovoltaického panelu, pokud se bude jednat o instalaci s pevně uchyceným panelem. Výstupem výpočtu jsou i grafy znázorňující změnu sledované veličiny v průběhu roku[14].

### 5.2 Získaná data pro vybrané místo

- Vybrané místo k analýze: Brno, Hlavní nádraží
- Souřadnice vybraného místa:  $49^{\circ}11'26.661''\text{N}$ ,  $16^{\circ}36'45.152''\text{E}$
- Optimální sklon panelu pro toto umístění:  $34^{\circ}$
- Orientace panelu:  $-1^{\circ}$  (východ =  $-90^{\circ}$ , jih =  $0^{\circ}$ , západ =  $90^{\circ}$ )

Tab. 5.1: Získaná data o slunečním svitu pto zvolené místo z PVGIS[14]

Měsíc	$G_h$	$G_{opt}$	$G_{90}$	$I_{opt}$	$T_L$	$D/G$	$T_D$	$T_{24h}$	$N_{DD}$
Leden	791	1210	1210	62	3,6	0,71	-1,2	-1,6	584
Únor	1450	2060	1900	56	3,8	0,64	2	1,1	467
Březen	2520	3140	2480	45	4,1	0,6	5,2	4,4	381
Duben	3860	4290	2800	32	4	0,54	10,7	9,5	163
Květen	4970	5060	2770	20	4,4	0,53	16,5	15,1	65
Červen	5140	5010	2550	13	4,8	0,55	18,9	17,7	28
Červenec	5360	5340	2800	17	4,6	0,51	20,2	19,2	6
Srpen	4480	4830	2950	28	4,7	0,52	21	19,6	36
Září	3030	3660	2720	41	4,5	0,55	15,3	14,2	156
Říjen	2010	2850	2570	55	4	0,56	10,6	9,7	332
Listopad	888	1280	1220	59	3,6	0,72	4,7	4	501
Prosinec	571	844	840	62	3	0,77	-0,9	-1,3	626
<b>Průměr</b>	<b>2930</b>	<b>3300</b>	<b>2240</b>	<b>34</b>	<b>4,1</b>	<b>0,55</b>	<b>10,3</b>	<b>9,3</b>	<b>3345</b>

$G_h$  - osvětlení vodorovné plochy [ $Wh/m^2$ ]

$G_{opt}$  - osvětlení optimálně nakloněné plochy [ $Wh/m^2$ ]

$G_{90}$  - osvětlení vertikální plochy [ $Wh/m^2$ ]

$I_{opt}$  - optimální sklon panelu [ $^\circ$ ]

$T_L$  - Linkeho atmosférický zákal  $[-]$ , vyjadřuje kolik slunečního záření je pohlceno aerosoly. Ukazuje optickou hustotu zamlžené atmosféry s vysokou vlhkostí oproti atmosféře čisté a jasné.

$D/G$  - poměr difúzního ku globálnímu záření  $[-]$

$T_D$  - průměrná denní teplota [ $^\circ C$ ]

$T_{24h}$  - průměrná teplota za 24 hodin [ $^\circ C$ ]

$N_{DD}$  - hodnota indexu HDD (Heating degrees-days)  $[-]$ , vyjadřuje měsíční sumu záporných odchylek průměrných denních teplot od dané referenční teploty ( $18^\circ C$ ) [17].

## 5.3 Návrh fotovoltaických systémů

Na následujících stránkách budou navrženy a analyzovány možnosti napájení zařízení fotovoltaickými systémy. Jedná se o zařízení, která nacházejí svůj význam v rozvinutých městských aglomeracích a slouží k zajištění dopravních a parkovacích služeb, zvýšení bezpečnosti provozu a zlepšení orientace v městské zástavbě.

### 5.3.1 Jízdenkový automat AVJ G napájený fotovoltaickým systémem

Jízdenkový automat AVJ 24G vyráběný firmou Mikroelektronika spol. s.r.o. z Vysokého Mýta je jedním z nejčastěji používaných typů výdejních jízdenkových automatů u nás. Využívá ho rovněž DPMB a.s. (Dopravní podnik města Brna). Ten v současné době provozuje 150 automatů, které jsou napájeny z veřejné elektrické sítě a jeden automat, který je uzpůsoben na bateriové napájení. Ovšem i zde je baterie dobíjena z veřejné elektrické sítě. Z povahy napájeného zařízení bude navrhnout fotovoltaický systém s akumulací pro zajištění nepřetržitého provozu jízdenkového automatu.

#### Technické parametry automatu

- *Rozměry automatu:* 1155x390x315 mm
- *Napájecí napětí  $U_N$ :* 207-253 V AC, transformace na 24V DC
- *Klidový proud  $I_N$ :* 100mA
- *Špičkový proud (topení a tisk)  $I_{MAX}$ :* 1A

#### Energetická analýza napájení automatu fotovoltaickým systémem

- *Maximální příkon automatu:*  $P_{MAX} = U_N \cdot I_{MAX} = 24 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 24 \text{ W}$
- *Maximální spotřebovaná elektrická energie za 1 den:*  $E_{MAX} = P_{MAX} \cdot 24 \text{ hodin} = 24 \text{ W} \cdot 24 \text{ hodin} = 576 \text{ Wh}$

Pro zabezpečení spolehlivého provozu bude počítáno s průměrným příkonem automatu:  $P_S = 12 \text{ W}$

- *Spotřebovaná elektrická energie s průměrným příkonem za 1 den:*  $E_S = P_S \cdot 24 \text{ hodin} = 12 \text{ W} \cdot 24 \text{ hodin} = 288 \text{ Wh}$

Fotovoltaický panel bude umístěn mimo vlastní tělo automatu na svislé tyči, která bude s automatem pevně konstrukčně spojena, případně na jiném blízkém

stožáru (např. stožár trakčního vedení). Toto provedení má několik výhod. Plocha fotovoltaického panelu není limitována horní plochou skříně automatu, panel lze optimálně sklonit a tím tak zvýšit množství dopadajícího záření. Panel bude na nedosažitelném místě chráněn před vandaly.

### Volba fotovoltaického panelu

Jako fotovoltaický panel pro napájení jízdenkového automatu byl zvolen polykrystalický panel Kyocera KC130GHT-2 s jmenovitým výkonem 130W. Jeho hlavní výhodou je vysoká účinnost (16%) a garance poklesu výkonu na 90% po 10 letech a na 80% po 20 letech.

Tab. 5.2: Technické parametry panelu Kyocera KC130GHT-2 [21]

Jmenovitý výkon $P_N$	130 W, +15/-5 %
Optimální napětí	17,6 V
Optimální proud	7,39 A
Napětí naprázdno	21,9 V
Proud nakrátko	8,02 A
Rozměry	1425 x 652 x 36(54) mm
Hmotnost	12,2 kg
Krytí	IP 65
Pokles výkonu po 10 letech	na 90% → 117 W
Pokles výkonu po 20 letech	na 80% → 104 W

### Výsledky pro vybraný panel z PVGIS pro zadané místo[14]

- Vybrané místo k instalaci: Brno, Hlavní nádraží
- Souřadnice vybraného místa: 49°11'26.661"N, 16°36'45.152"E
- Optimální sklon panelu pro toto umístění: 34°
- Orientace panelu: -1° (východ = -90°, jih = 0°, západ = 90°)
- Jmenovitý výkon FV systému: 0.13 kW (křemík)
- Účinnost fotovoltaického panelu: 16%
- Odhadované ztráty kvůli teplotě: 6.8% (místní teplota prostředí)
- Odhadované ztráty úhlovou odrazivostí: 3.0%

Tab. 5.3: Roční hodnoty hodnot pro vybraný panel a jeho umístění [14]

<b>Měsíc</b>	$E_M$	$G_D$	$G_M$
Leden	3,95	1,21	37,4
Únor	6,01	2,06	57,7
Březen	9,94	3,14	97,2
Duben	12,8	4,29	129
Květen	15,2	5,06	157
Červen	14,4	5,01	150
Červenec	15,8	5,34	166
Srpen	14,3	4,83	150
Září	10,8	3,66	110
Říjen	8,92	2,85	88,3
Listopad	3,96	1,28	38,3
Prosinec	2,76	0,84	26,2
<b>Průměr</b>	<b>9,9</b>	<b>3,3</b>	<b>101</b>
<b>Celkem za rok</b>	<b>119</b>		<b>1210</b>

- Další ztráty (vodiče, regulátor): 16.0%

$E_M$  - průměrná produkce elektrické energie za měsíc  $[kWh]$

$G_D$  - denní průměr globálního záření pro čtvereční metr plochy zadaného systému  $[kWh/m^2]$

$G_M$  - měsíční průměr globálního záření pro čtvereční metr plochy zadaného systému  $[kWh/m^2]$

Z hodnot je patrné, že panel vyrobí za rok 119 kWh elektrické energie, což pokryje spotřebu automatu, bude-li pracovat s předpokládaným příkonem  $P_S = 12\text{ W}$ . Grafické průběhy získaných hodnot jsou uvedeny v příloze D (obrázek D.1, D.2, D.3). Maximální výkon panelu by se měl po 10 letech provozu snížit na 90% jmenovitého výkonu, tzn. na 117 W. Pokud budeme provádět analýzu systémem PVGIS pro tuto hodnotu, zjistíme, že panel s výkonem 117 W je ročně schopen dodat 107 kWh elektrické energie, což by přesto mělo být dostačující pro provozování automatu. Z údajů výrobce lze předpokládat, že účinnost FV panelu klesá lineárně o 10% jmenovitého výkonu za 10 let. Lze tedy provést jednoduchý výpočet, který nám určí, kolik let provozu je FV panel schopen dodávat potřebný příkon pro jízdenkový automat.

Tab. 5.4: Průběh množství vyrobené elektrické energie během doby provozu FV panelu

$R$	$D$	$P_R$	$E_R$	$X$
1.	1	128,7	118,00	12,88
2.	2	127,4	116,00	10,88
3.	3	126,1	115,00	9,88
4.	4	124,8	114,00	8,88
5.	5	123,5	113,00	7,88
6.	6	122,2	112,00	6,88
7.	7	120,9	110,00	4,88
8.	8	119,6	109,00	3,88
9.	9	118,3	108,00	2,88
10.	10	117,0	107,00	1,88
11.	11	115,7	106,00	0,88
12.	12	114,4	105,00	-0,12
13.	13	113,1	103,00	-2,12
14.	14	111,8	102,00	-3,12
15.	15	110,5	101,00	-4,12
16.	16	109,2	99,80	-5,32
17.	17	107,9	98,60	-6,52
18.	18	106,6	97,40	-7,72
19.	19	105,3	96,20	-8,92
20.	20	104,0	95,00	-10,12

### Příklad výpočtu

- Spotřebová elektrická energie automatem za jeden rok:  $E_{JA} = P_S \cdot 24 \cdot 365 = 12 \cdot 24 \cdot 365 = 105120 \text{ Wh}$
- $P_R = P_N \cdot \frac{100-D}{100}$
- $X = E_R - E_{JA}$

$R$  - rok provozu FV panelu

$D$  - procentní pokles jmenovitého výkonu za rok provozu [%]

$P_R$  - výkon FV panelu na konci roku  $R$  [W]

$E_R$  - elektrická energie dodaná panelem za rok s výkonem  $P_R$  [kWh] (data získaná z PVGIS)

$X$  - rozdíl dodávky a spotřeby elektrické energie [kWh]

Z tabulky 5.4, sloupce X, který vyjadřuje přebytek nebo nedostatek teoreticky vyrobené elektrické energie, je patrné že na konci 11. roku provozu by panelu měl klesnout jmenovitý výkon tak, že nebude schopen pokrýt projektovanou spotřebu automatu v dalším roce.

### **Volba solárního regulátoru**

Solární regulátor slouží k řízení nabíjení akumulátoru, k ochraně akumulátoru proti přebíjení, podpětí při vybíjení a ochrana proti zkratu na výstupu zátěže.

Vzhledem k parametrům fotovoltaického panelu byl vybrán programovatelný regulátor CX 10 s maximálním proudem z panelu a do zátěže 10 A [20].

### **Volba akumulátoru**

Fotovoltaický systém bude navrhnout jako systém se stálou akumulací vyrobené energie. To znamená, že akumulátor bude stále napojen na regulátor fotovoltaického panelu. Jízdenkový automat bude na akumulátor připojen přímo přes zvyšující měnič napětí DC/DC 12/24V. Jako ideální volba se jeví použití bezúdržbových stančních akumulátorů, které mají projektovanou životnost 10 let. Volba akumulátoru je velice důležitým krokem při návrhu fotovoltaického systému. Akumulátor bude zajišťovat napájení zařízení při nepříznivých slunečných podmínkách, které lze ve vybrané lokalitě očekávat zejména v zimních měsících.

Akumulátor bude navrhnout tak, aby byl schopen pokrýt předpokládaný příkon automatu, při nepříznivých slunečných podmínkách, po dobu jednoho týdne. Jak vyplývá z následující energetické bilance, akumulátor by byl schopen zajistit napájení automatu po dobu celého roku tak, že by v letních měsících akumuloval přebytečnou vyrobenou energii pro zimní nepříznivé měsíce. V tomto případě by však velikost akumulátoru vycházela nepříjemně vysoká a neslučovala by se s povahou zařízení a jeho konstrukčním možností (viz. výpočet pod tabulkou 5.5) [22].

$E_M$  - průměrná produkce elektrické energie za měsíc [kWh]

$E_A$  - předpokládaná spotřeba automatu pro daný měsíc [kWh]

$E_M - E_A$  - + přebytek, - nedostatek vyrobené energie v daném měsíci [kWh]



Tab. 5.5: Bilance vyrobené a spotřebované elektrické energie v průběhu roku

Měsíc	$E_M$	$E_A$	$E_X$
Leden	3,95	8,928	-4,978
Únor	6,01	8,352	-2,342
Březen	9,94	8,928	1,012
Duben	12,8	8,64	4,16
Květen	15,2	8,928	6,272
Červen	14,4	8,64	5,76
Červenec	15,8	8,928	6,872
Srpen	14,3	8,928	5,372
Září	10,8	8,64	2,16
Říjen	8,92	8,928	-0,008
Listopad	3,96	8,64	-4,68
Prosinec	2,76	8,928	-6,168
<b>Průměr</b>	<b>9,9</b>		
<b>Celkem za rok</b>	<b>119</b>	<b>105,408</b>	<b>13,432</b>

**Výpočet kapacity akumulátoru pro celoroční provoz automatu**  $S_- = E_{X\text{ leden}} + E_{X\text{ unor}} + E_{X\text{ říjen}} + E_{X\text{ listopad}} + E_{X\text{ prosinec}} = -4,978 - 2,342 - 0,008 - 4,68 - 6,168 = -18,176\text{ kWh}$

Toto množství energie by se muselo během příznivé části roku uložit v akumulátorech, pro pokrytí zimních měsíců.

$$C_A = \frac{|S_-|}{U_A} = \frac{18,176\text{ kWh}}{12\text{ V}} = 1,515\text{ kWh}$$

$S_-$  - suma nedostatků vyrobené energie za rok [kWh]

$C_A$  - kapacita akumulátorů [Ah]

$U_A$  - napětí akumulátorů [V]

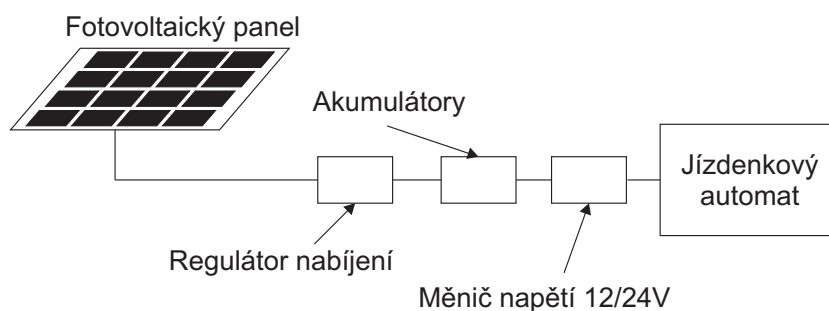
**Výpočet kapacity akumulátoru pro týdenní provoz automatu** Z výše stanovené podmínky vyplývá, že akumulátor by měl být schopen zajistit napájení jízdenkového automatu po dobu jednoho týdne.

- *Spotřeba elektrické energie za 7 dní:*  $E_{JA7} = P_S \cdot 24 \cdot 7 = 12\text{ W} \cdot 24 \cdot 7 = 2016\text{ Wh}$
- *Potřebná kapacita akumulátorů:*  $C_A = \frac{E_{JA7}}{U_A} = \frac{2016}{12} = 168\text{ Ah}$

Z katalogu firmy FIAMM SP byly vybrány dva akumulátory 12 SP 80 s napětím 12 V a každý s kapacitou 80 Ah. To sice zcela neodpovídá výše zmíněné podmínce pro schopnost akumulátorů napájet automat po dobu 7 dní, ale z dané řady akumulátorů vyhovuje nejlépe. Akumulátory budou zapojeny paralelně.

### Volba měniče napětí

Měnič napětí slouží k přeměně elektrického proudu s určitým napětím na elektrický proud s jiným napětím [16]. V našem případě použijeme zvyšující stejnosměrný měnič (DC/DC 12/24V), který bude zvyšovat výstupní napětí z fotovoltaického systému na hodnotu napětí, která je nutná k napájení automatu. Měnič bude připojen přímo na akumulátory. Jako vhodný napěťový měnič se jeví výrobek společnosti MASCOT, typ 8862 v provedení 12/24V. Měnič může být na výstupu zatížen proudem až 1,7 A, ve špičce až 2,2 A. Účinnost měniče je 75% [23].



Obr. 5.1: Principiální schéma zapojení fotovoltaického systému

### Ekonomická analýza napájení automatu fotovoltaickým systémem

Ekonomická analýza napájení automatu má za úkol odpovědět na otázku, jaká je návratnost investice do varianty napájení fotovoltaickým systémem. Analýza se bude zabývat obdobím prvních 20. let provozu jízdenkového automatu. Během této doby se předpokládá, že roční náklady na elektrickou energii pro síťovou verzi činí 3243,- Kč. V případě napájení fotovoltaickým systémem se během sledovaného období musí počítat s výměnou akumulátorů a fotovoltaického panelu z důvodu jejich omezené životnosti.

Tabulka 5.6 ukazuje výčet hlavních zařízení, jež jsou potřeba k sestavení fotovoltaického systému, který by byl schopen napájet analyzovaný jízdenkový automat. Při podrobnější analýze konstrukčního zařízení se jistě ještě objeví další položky, ale ty by již neměly tolik navýšit cenu zařízení.

Využívání fotovoltaických systémů pro napájení jízdenkových automatů si jistě vyžádá další investice do servisního zázemí obsluhy. Jedná se především o pořízení

Tab. 5.6: Investiční náklady pro zřízení napájení automatu fotovoltaickým systémem

Položka	cena bez DPH v Kč	Pozn.
Fotovoltaický panel KYOCERA KC130GHT-2	13 650,0 Kč	
2 x baterie 12 SP 80 (2x 5663 Kč)	11 326,0 Kč	
Regulátor nabíjení CX 10	999,0 Kč	
Indikátor stavu baterie Bargraf 12V	590,0 Kč	
Napěťový měnič Mascot 8862 verze 12/24V	2 386,5 Kč	
Vodiče a další elektropříslušenství	2 000,0 Kč	odhad
Svislá tyč, uchycení panelu, další komponenty	5 000,0 Kč	odhad
<b>Celkem</b>	<b>35 951,5 Kč</b>	

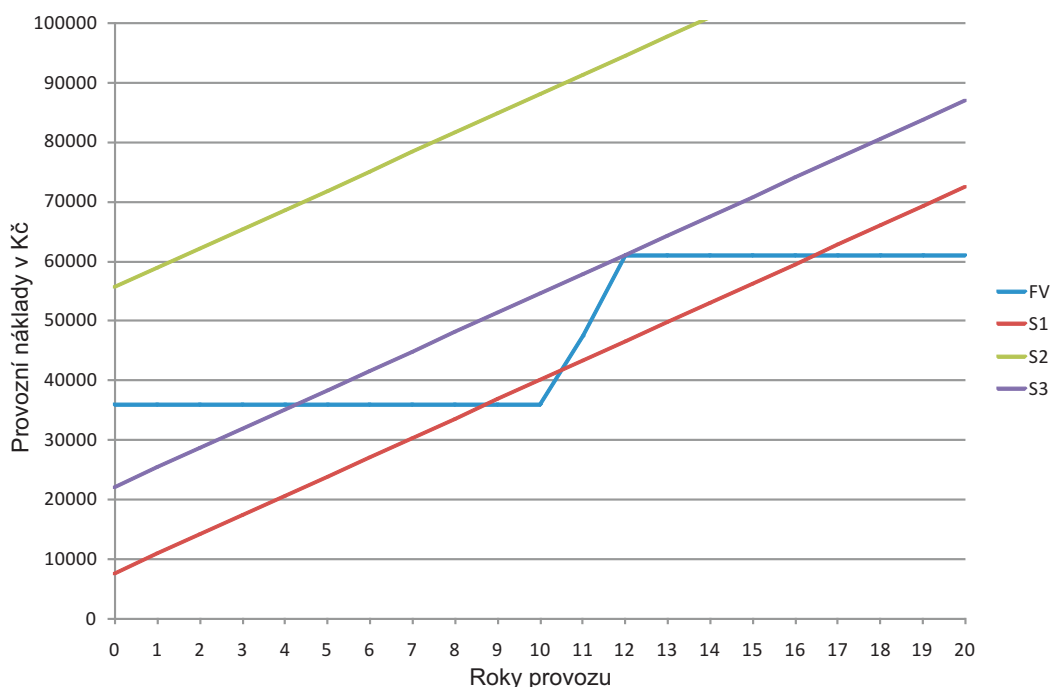
automatické nabíjecí centrály, která bude zajišťovat dobíjení vybitých akumulátorů, dále zakoupení určitého počtu rezervních akumulátorů, za které budou v případě potřeby vyměněny vybité akumulátory v automatech.

Tab. 5.7: Investiční náklady pro zřízení napájení automatu z distribuční sítě pro různé varianty

Položka	cena bez DPH v Kč		
	S1	S2	S3
Projekt usazení a připojení automatu	3 500,0 Kč	3 500,0 Kč	3 500,0 Kč
Příhláška automatu k odběru el. energie	2 000,0 Kč	2 000,0 Kč	2 000,0 Kč
Výkop, kabeláž atd.	2 000,0 Kč	50 000,0 Kč	16 511,5 Kč
<b>Celkem</b>	<b>7 500,0 Kč</b>	<b>55 500,0 Kč</b>	<b>22 011,5 Kč</b>

V tabulce 5.7 jsou uvedeny limitní cenové varianty (S1 a S2) zřízení síťového napájení pro analyzovaný automat. Varianty se liší v ceně instalační cesty elektrické přípojky, která se může pohybovat v rozmezí 2. až 50. tisíc Kč. Varianta S3 představuje maximální cenu instalační cesty, pro kterou se vyplatí budovat síťové napájení automatu. Tato varianta počítá s životností fotovoltaického panelu (11 let - viz. tab. 5.4) s životností akumulátorů (10 let) a s nutností investice do obnovy těchto zařízení v průběhu sledovaných 20. let provozu automatu (viz. tabulka E.1 uvedená v příloze). Cena nového panelu, který se bude muset po 11. roce provozu zařízení vyměnit je zde brána jako aktuální cena stávajícího vybraného panelu. Lze ovšem

předpokládat, že za 11 let bude na trhu s fotovoltaickými technologiemi jiná situace než panuje dnes a ceny panelů se sníží.



Obr. 5.2: Předpokládaný průběh nákladů pro 20 let provozu jízdního automatu pro různá řešení napájení

Průběh varianty S1 znázorňuje průběh provozních nákladů pro síťovou verzi napájení s minimálními počátečními investicemi na zbudování napájecí cesty. Průběh varianty S2 naopak udává vývoj pro maximální investici na zbudování napájecí cesty. Každoroční růst těchto nákladů znamená spotřebu elektrické energie nutné k provozu automatu. Průběh varianty FV popisuje průběh investic na instalaci a provoz napájení z fotovoltaických panelů. Varianta FV vyžaduje větší počáteční investici, avšak ve srovnání s ostatními variantami minimální provozní náklady. V této variantě se předpokládá investice do výměny akumulátorů a fotovoltaického panelu po skončení doby jejich životnosti. Průběh varianty S3 se odvíjí od celkových investičních nákladů do FV verze napájení (včetně výměny baterie a panelu). Na ose nákladů vytyčuje hodnotu maximálních investic na zbudování síťové verze napájení, která by byla v období 11 let stejně nákladná jako verze s fotovoltaickým systémem.

### 5.3.2 Parkovací automat SITTRAFFIC SITY 5 napájený fotovoltaickým systémem

Parkovací automaty od společnosti ELTODO jsou velmi rozšířené, používají se ve více než 30 městech v České republice. Automat je nabízen ve verzi pro napájení z elektrické sítě, z baterií nebo z fotovoltaického systému. Následující energetická a ekonomická analýze se bude věnovat právě verzi napájené fotovoltaickým systémem.

#### Technické parametry parkovacího automatu (solární verze) [24]

- *Napájení:* 12 V, odběr cca 4 mA v režimu Standby
- *Solární modul:* 12 V/20 W
- *Akumulátor:* 12 V/65 Ah

#### Energetická analýza napájení parkovacího automatu fotovoltaickým systémem

Z údajů výrobce vyplývá, že pro napájení automatu je použit fotovoltaický modul o jmenovitém napětí 12 V a výkonu 20 W. Automat je konstruován jako nízkopříkonové zařízení a i takto malý panel je schopen zabezpečit napájení automatu.

Pro tento jmenovitý výkon panelu je vhodné použít fotovoltaické minipanely z nabídky české společnosti Solartec, případně využít výrobu fotovoltaických panelů na zakázku (jako v tomto případě).

*Panely Solartec SMP 12-350:[19]*

- *Rozměry:* 506x126x8 mm
- *Optimální napětí:* 12 V
- *Optimální proud:* 0,35 A
- *Maximální výkon:* 5,9 W

Použitím 4 panelů zapojených paralelně dostaneme výkon  $P_N = 4,5,9 W = 23,6 W$ .

Tento výkon je schopen pokrýt napájení parkovacího automatu. Vhodný solární regulátor pro tento fotovoltaický systém je regulátor APPLE 5 s maximálním proudem 5 A. Výrobce parkovací automat osazuje akumulátorem s kapacitou 65 Ah. Vhodnou volbou by bylo opět použití bezúdržbového akumulátoru s dlouhou životností, který zajistí provoz automatu v tmavých dnech. Těmto požadavkům odpovídá akumulátor GP12650 s kapacitou 65 Ah.

Tab. 5.8: Vyrobená elektrická energie v jednotlivých měsících během roku [14]

<b>Měsíc</b>	<b>Em</b>
Leden	0,735
Únor	1,120
Březen	1,850
Duben	2,380
Květen	2,820
Červen	2,680
Červenec	2,940
Srpen	2,660
Září	2,000
Říjen	1,660
Listopad	0,736
Prosinec	0,513
<b>Průměr</b>	<b>1,840</b>
<b>Rok</b>	<b>22,100</b>

### Ekonomická analýza napájení parkovacího automatu fotovoltaickým systémem

Tab. 5.9: Investiční náklady pro napájení automatu fotovoltaickým systémem

<b>Položka</b>	<b>Cena bez DPH v Kč</b>
Minipanel SMP12-350 (4 x 2330,05 Kč)	9 320,20 Kč
Solární regulátor APPLE 5	814,00 Kč
Akumulátor GP12650	3 141,00 Kč
Uchycení panelu, elektroinstalační materiál, atd.	5 000,00 Kč
<b>Celkem</b>	<b>18 275,20 Kč</b>

Dodávaná solární verze automatu je pravděpodobně vybavena fotovoltaickým systémem, vyvinutým na zakázku a přímo na míru parkovacímu automatu. Lze předpokládat, že cenový rozdíl mezi síťovou a solární verzí automatu nebude tak výrazný.

### 5.3.3 Informativní dopravní značka napájená fotovoltaickým systémem

Informativní dopravní značky jsou většinou umísťovány na místech, kde je třeba zvýšená pozornost účastníků silničního provozu. Označují přechody pro chodce, úseky ulic kolem základních škol, kde může hrozit vběhnutí dětí do jízdního pruhu.

Pro analýzu byla vybrána informativní dopravní značka "Přechod pro chodce" vybavená povrchovou reflexní vrstvou a doplněná o řadu LED diod, které značku zvýrazňují blikáním s frekvencí 1 Hz. Ovládání značky je možné doplnit infračervenou závorou, která aktivuje diody při vstupu chodce do vozovky [25].

#### Technické parametry informační značky [25]

- *Světelný zdroj*: vysoce svítivé LED prvky
- *Provoz*: průměrně 5 hodin denně
- *Frekvence blikání*: 1 Hz
- *Příkon*: 22 W
- *Krytí*: IP 43
- *Světelný zdroj*: -20°C až +50°C



Obr. 5.3: Informativní značka "Přechod pro chodce" s LED diodami

#### Energetická analýza napájení informativní značky fotovoltaickým systémem

V analyzované aplikaci bude informativní značka doplněna infračervenou závorou, která po přerušení aktivuje blikání LED diod a tím signalizovat přítomnost chodce.

V případě kontinuálního provozu by měla značka značné energetické nároky bylo by výhodnější realizovat síťové napájení, případně bateriové s dobíjením z veřejného osvětlení.

V této aplikaci se tedy bude jednat o fotovoltaický systém s akumulací. Diodové blikání bude spínáno infračervenou závorou a předpokládaná doba činnosti LED diod bude 5 hodin denně. Bude počítáno s příkonem 22 W.

- *Spotřebovaná elektrická energie za 5 hodin provozu:*  $E_S = P_S \cdot 5 \text{ hodin} = 22 \text{ W} \cdot 5 \text{ hodin} = 110 \text{ Wh}$

### Volba fotovoltaického panelu

Pro tuto aplikaci byl vybrán fotovoltaický panel KYOCERA KC85T-1 se jmenovitým výkonem 87 W. Výrobce udává účinnost panelu 16% a garantuje pokles výkonu na 90% jmenovitého výkonu po 10 letech a na 80% po 20 letech. Z toho vyplývá, že panel po 10 letech provozu bude disponovat výkonem 78,3 W a po 20 letech 69,6 W výkonu. Při návrhu panelu je třeba na tento pokles brát zřetel a navrhovat panel s ohledem na to jak dlouho planujeme zařízení provozovat. Lze tedy opět provést analýzu, jak dlouho bude panel schopen dodávat výkon pro řešenou aplikaci (viz. Tabulka F.2 v příloze). Z tabulky vyplývá, že by panel měl disponovat dostatečným výkonem po 20 let provozu zařízení [21].

*Technické parametry fotovoltaického panelu:*

Tab. 5.10: Technické parametry panelu Kyocera KC85T-1[21]

Jmenovitý výkon $P_N$	87 W, -10/+5 %
Optimální napětí	17,4 V
Optimální proud	5,02 A
Napětí naprázdno	21,7 V
Proud nakrátko	5,34 A
Rozměry	1007 x 652 x 36 mm
Hmotnost	8,30 kg
Krytí	IP 65

### Volba akumulátoru

Volba akumulátoru úzce souvisí s volbou fotovoltaického panelu a s povahou zařízení, které bude fotovoltaický systém napájet. U analyzované aplikace se předpokládá uplný bezobslužný provoz (narozdíl například od jízdenkového automatu). V tabulce F.1 je uvedena dvouletá analýza pro roční akumulaci vyrobené elektrické



energie, kdy se přebytečná elektrická energie akumuluje a "schovává" na období, kdy nejsou příhodné sluneční podmínky. Pro roční akumulaci vychází akumulátor o velikosti 250 Ah. Ovšem s takto velkým akumulátorem by byla velice obtížná manipulace a proto je by bylo výhodnější dva akumulátory 135 Ah, zapojené paralelně [22].

### **Volba solárního regulátoru**

Pro tuto aplikaci by rovněž stačil, již výše použitý, solární regulátor APPLE 5 se jmenovitým proudem z panelu a do zátěže 5 A.

### **Ekonomická analýza napájení informativní značky fotovoltaickým systémem**

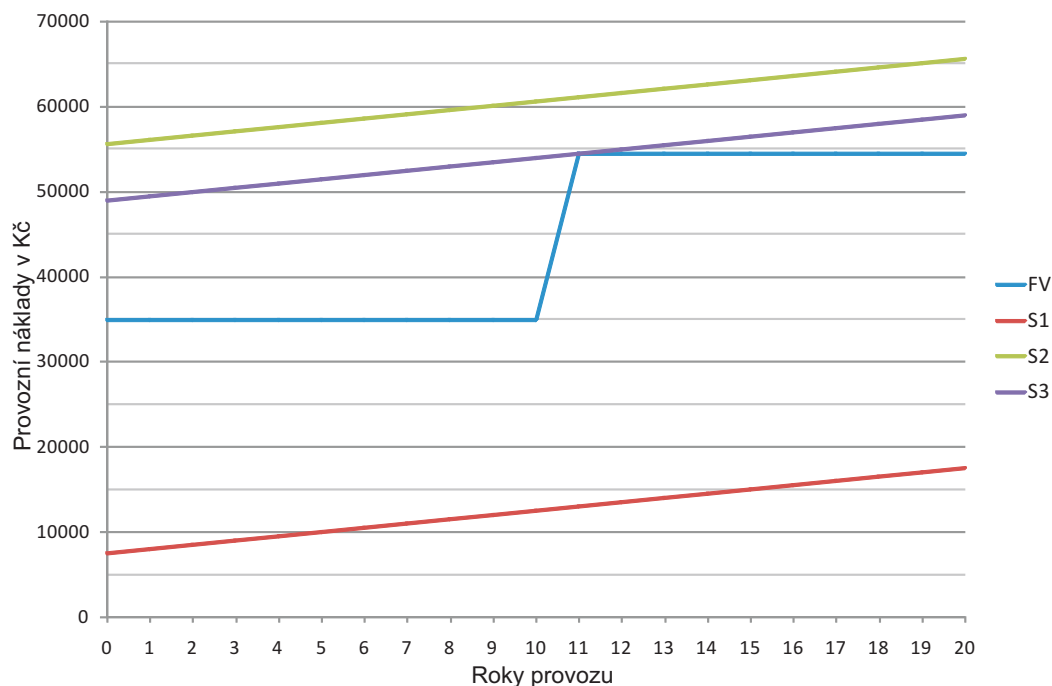
Ekonomická analýza bude mít za cíl porovnat návratnost investice do napájení informativní značky fotovoltaickým systémem. Pro neměřené pouliční odběry platí tarif 13,93,- Kč za každých započatých 10 W příkonu. Bude uvažováno, že se cena elektrické přípojky, v případě síťového napájení značky může pohybovat v rozmezí 7500 - 55500,-Kč.

Tab. 5.11: Rozpis položek pro napájení informativní značky fotovoltaickým systémem

<b>Položka</b>	<b>Cena bez DPH v Kč</b>
Fotovoltaický panel Kyocera KC85T-1	9 600,00 Kč
Solární regulátor APPLE 5	814,00 Kč
Akumulátor 12 SP 135 (2 x 9 753,-Kč)	19 506,00 Kč
Uchycení panelu, elektroinstalační materiál, atd.	5 000,00 Kč
<b>Celkem</b>	<b>34 920,00 Kč</b>

Stejně jako pro jízdenkový automat lze sestavit diagram, který nám ukáže náklady na jednotlivé varianty napájení pro jednotlivé varianty napájení (Obrázek 5.4).

Průběh S1 znázorňuje průběh nákladů pro nejnižší investici do realizaci napájecí cesty, průběh S2 naopak pro nejvyšší náklady na její zbudování. Průběh FV znázorňuje počáteční investici a předpokládaný průběh nákladů (včetně výměny akumulátorů po 10 letech provozu) pro verzi informativní značky s napájením fotovoltaickým systémem. Průběh S3 znázorňuje investice a provozní náklady verze síťového napájení, jejíž náklady budou po 10 let stejné jako investice a náklady do fotovoltaického systému.



Obr. 5.4: Předpokládaný průběh nákladů pro 20 let provozu informativní značky pro různá řešení napájení

### 5.3.4 Solární napájení osvětlení domovního čísla

Osvětlení čísla domu přispívá k lepší orientaci v domovní zástavbě, ke snadnějšímu zasahování rychlé záchranné služby a požárního sboru nebo ke správné orientaci poštovních a kurýrních služeb.

Solární osvětlení domovního čísla se již objevilo v nabídce několika prodejců. Jedná se o kompaktní cedulky vybavené fotovoltaickým minipanelem, čidlem osvětlení, sadou akumulátorů a světelným zdrojem. U tohoto typu se nepředpokládá uplný bezúdržbový provoz, fotovoltaický slouží pouze k dobíjení akumulátorů, ale rozhodně není schopen zajistit kontinuální provoz. Použité akumulátory jsou standardní velikosti AA.

V našem návrhu solárního osvětlení čísla domu bude použit panel od společnosti Solartec s typovým označením SMP 8-180 se jmenovitým výkonem  $P_N = 1,8 W$  a napětím  $U_N = 8 V$ . Při volbě akumulátoru bude brát zřetel na jejich snadné dobíjení v komerčních nabíječkách, proto i u navrhovaného zařízení padne volba na čtyřici NiMH AA akumulátorů. Jako světelný zdroj bude použito dvou bílých LED diod, které budou zabezpečovat rovnoměrné osvětlení plochy, na které bude napsáno číslo domu.

V naší analýze budeme předpokládat, že osvětlení domovního bude svítit 12

hodin denně, čidlo osvětlení ho bude spínat při nedostatečné úrovni venkovního světla. Akumulátory budou řazeny v serii a každý bude mít jmenovitou kapacitu 2700mAh. Světelný tok LED diod bude do osvětlené plochy rozveden světlovody [26].

### Technické parametry použitých komponent

- *Fotovoltaický panel*: Solartec, SMP 8-180,  $P_N = 1,8\text{ W}$ ,  $U_N = 8\text{ V}$
- *Akumulátory*: 4 x NiMH AA 2700mAh, 1,2V
- *LED diody*: 2 x bílá LED dioda, průměr 5 mm,  $U_N = 3,3\text{ V}$ ,  $I_N = 25\text{ mA}$

Tab. 5.12: Energetická analýza vyrobené elektrické energie a nabití baterie v průběhu roku

					$E_B$ kWh	
Měsíc	Počet dní	$E_M$	$E_A$	$X$	začátek měsíce	konec měsíce
Leden	31	0,0529	0,0614	-0,0085	0,0130	0,0045
Únor	29	0,0805	0,0574	0,0231	0,0045	0,0130
Březen	31	0,1330	0,0614	0,0716	0,0130	0,0130
Duben	30	0,1710	0,0594	0,1116	0,0130	0,0130
Květen	31	0,2030	0,0614	0,1416	0,0130	0,0130
Červen	30	0,1930	0,0594	0,1336	0,0130	0,0130
Červenec	31	0,2120	0,0614	0,1506	0,0130	0,0130
Srpen	31	0,1910	0,0614	0,1296	0,0130	0,0130
Září	30	0,1440	0,0594	0,0846	0,0130	0,0130
Říjen	31	0,1190	0,0614	0,0576	0,0130	0,0130
Listopad	30	0,0530	0,0594	-0,0064	0,0130	0,0066
Prosinec	31	0,0369	0,0614	-0,0245	0,0066	-0,0179
<b>Průměr</b>		0,1330				
<b>Rok</b>		<b>79,50</b>	<b>0,72</b>			

Z tabulky 5.12 je patrné, že hodnota energie uchovaná v baterii  $E_B$  je po celý rok kladná, jen na konci prosince klesne do záporných hodnot. Z toho vyplývá, že nutnost dobýt baterie by byla pouze na přelomu prosince a května. Dále jsou v této tabulce uvedeny hodnoty měsíčně vyrobené elektrické energie pro vybraný panel.

V tabulce 5.13 je uveden rozpis hlavních nákladů na realizaci solárního osvětlení čísla domu. Tyto náklady ovšem převyšují cenu, za kterou se dá obdobné světlo již na trhu pořídit. Tyto výrobky jsou vyráběny ve velkých sériích, fotovoltaické panely jsou vyrobeny na míru konkrétnímu konstrukčnímu provedení.

Tab. 5.13: Rozpis nákladů na konstrukci solárního osvětlení čísla domu

<b>Položka</b>	<b>Cena bez DPH v Kč</b>	
Solartec, SMP 8-180	1 377,90 Kč	
Bílé LED diody (2 x 10 Kč)	20,00 Kč	
Akumulátory AA NiMH 2700mAh	355,00 Kč	
Konstrukce, další součástky	1 000,00 Kč	odhad
<b>Celkem</b>	<b>2 752,90 Kč</b>	

## 6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce řešila problematiku fotovoltaických systémů, jejich návrh, výrobu a použití v prostředí rozvinuté městské aglomerace.

Teoretická část práce byla věnována zhodnocení využití energie, která na zem dopadá ve formě slunečního záření. V této energii spočívá velký potenciál, protože by byla schopna bezpečně pokrýt veškerou energetickou spotřebu lidstva. V současné době je však problematické tuto energii přeměnit na jinou, jednoduše využitelnou formu energie, např. na elektřinu. Technologie fotovoltaických článků, které toto dokáží, nejsou v současné době na takové úrovni, aby mohly významně změnit složení světových energetických zdrojů. Přesto fotovoltaické systémy nacházejí využití jako zdroje pro nenáročné či odlehle aplikace. Přesto fotovoltaika představuje obnovitelný zdroj energie, do kterého se vkládají velké naděje. Velké prostředky se investují do vývoje nových typů článků a jeho využití je široce podporováno jak z evropských, tak z národních dotačních programů.

Praktická část byla zaměřena na návrh čtyř fotovoltaických systémů pro napájení zařízení, která nacházejí využití v rozvinuté městské aglomeraci a přispívají k organizaci městské hromadné dopravy, vybírání parkovacích poplatků, zvýšení bezpečnosti silničního provozu a lepší orientaci v městské zástavbě. Jedná se o jízdenkový automat používaný brněnským dopravním podnikem, parkovací automat, informativní dopravní značku a osvětlení popisného čísla domu.

Pro fotovoltaický systém jízdenkového automatu byl vybrán fotovoltaický panel Kyocera se jmenovitým výkonem 130 W a účinností 16%. Při celoroční akumulaci elektrické energie byl schopen pokrýt spotřebu automatu, avšak při této akumulaci by použitý akumulátor neodpovídal konstrukční povaze zařízení. Proto byly zvoleny akumulátory s celkovou kapacitou 180 Ah, které budou schopny při nepříznivých slunečních podmínkách zajistit provoz automatu po dobu jednoho týdne. Ovšem v období zimních měsíců akumulátory nebudou schopny pokrýt spotřebu automatu a bude nutné jejich dobítí, či výměna za nabité akumulátory.

Parkovací automat napájený fotovoltaickým systémem není v našich městech již ničím neobvyklým. Společnost Eltodo a.s. nabízí své parkovací automaty i ve verzi s fotovoltaickým napájením. Parkovací automat je velice energeticky nenáročným zařízením, při nečinnosti se přepíná do režimu "standby", který výrazně snižuje spotřebu a umožňuje tak použití malého fotovoltaického panelu.

Informativní značka "Přechod pro chodce" slouží k výraznému označení místa, kde je umístěn přechod pro chodce. Zařízení je vybaveno infračervenou závorou, která po přerušení aktivuje blikání LED diod, které ostatním účastníkům silničního provozu signalizují přítomnost chodce na přechodu. U tohoto zařízení se nepředpokládá kontinuální provoz, a proto se panel a akumulátory navrhovaly na bezúdrž-

bový kontinuální provoz po dobu celého roku.

Solární napájení osvětlení čísla domu se pomalu stává obvyklou součástí fasád městských domů. Provoz osvětlení čísla se řídí čidlem, které snímá uroveň venkovního světla a zapíná osvětlení domovního čísla. V tomto zařízení byly použity čtyři akumulátory AA, jejichž kapacita pokryje celoroční provoz světla pouze s jedním dobitím na přelomu prosince a ledna, kdy panují nepříznivé světlené podmínky.

# LITERATURA

- [1] LIBRA M. a POULEK V. *Solární energie* [kniha]. Praha: ČZU, 2006. xxx s ISBN: 80-213-1488-5.
- [2] LIBRA M. a POULEK V. *Solární energie* [kniha]. Praha: ČZU, 2005. 122 s ISBN: 80-213-1335-8.
- [3] MURTINGER K., BERANOVSKÝ J. a TOMEŠ M. *Fotovoltaika. Elektřina ze slunce* [kniha]. Brno: Vydavatelství ERA, 2007. 100 s ISBN: 978-80-7366-100-7.
- [4] BAŘINKA R. a KLIMEK P. *Obnovitelné zdroje energie pro ČR - část Postupný rozvoj využití sluneční energie fotovoltaickou technologií* [online]. Praha: ČEZ, 2007. 186 s. Dostupné z URL: <<http://www.cez.cz/cs/vzdelavani/pro-profesionaly/odborne-publikace/8.html>>.
- [5] U.S. Department of Energy - Energy Efficiency and Renewable Energy, Solar Energy Technologies Program *PV Connected to the Utility Grid* [online]. 2006, poslední aktualizace 5. 1. 2006 [cit. 24. 3. 2008]. Dostupné z URL: <<http://www1.eere.energy.gov/solar/grid.connect.html>>.
- [6] U.S. Department of Energy - Energy Efficiency and Renewable Energy, Solar Energy Technologies Program *PV in Simple, 'Stand-Alone' Systems* [online]. 2006, poslední aktualizace 5. 1. 2006 [cit. 24. 3. 2008]. Dostupné z URL: <<http://www1.eere.energy.gov/solar/simple.systems.html>>.
- [7] U.S. Department of Energy - Energy Efficiency and Renewable Energy, Solar Energy Technologies Program *PV Systems with Battery Storage* [online]. 2006, poslední aktualizace 5. 1. 2006 [cit. 24. 3. 2008]. Dostupné z URL: <[http://www1.eere.energy.gov/solar/pv\\_batteries.html](http://www1.eere.energy.gov/solar/pv_batteries.html)>.
- [8] U.S. Department of Energy - Energy Efficiency and Renewable Energy, Solar Energy Technologies Program *PV in Hybrid Power Systems* [online]. 2006, poslední aktualizace 5. 1. 2006 [cit. 24. 3. 2008]. Dostupné z URL: <<http://www1.eere.energy.gov/solar/hybrid.systems.html>>.
- [9] Czech RE Agency, o.p.s. *Instalovaný výkon fotovoltaiky 2007* [online]. 2008, poslední aktualizace 2008 [cit. 7. 4. 2008]. Dostupné z URL: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika/vykon-fv>>.
- [10] European Commission PV-TRAC *EUR 21242 - A Vision for Photovoltaic Technology* [kniha]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2005. 41 s ISBN 92-894-8004-1 Dostupné z URL: <[http://www.czrea.org/files/pdf/studie/Vision\\_PV\\_technology.pdf](http://www.czrea.org/files/pdf/studie/Vision_PV_technology.pdf)>.

- [11] Czech RE Agency, o.p.s. *Fotovoltaika pro každého* [online]. 2008, poslední aktualizace 2008 [cit. 7. 4. 2008]. Dostupné z URL: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>>.
- [12] Wikipedia *Polovodič* [online]. [cit. 2. 12. 2007]. Dostupné z URL: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Polovodi%C4%8D>>.
- [13] Wikipedia *Photovoltaics* [online]. [cit. 7. 4. 2008]. Dostupné z URL: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>>.
- [14] PVGIS *Photovoltaic Geographical Information System* [online]. [cit. 25. 5. 2008]. Dostupné z URL: <<http://sunbird.jrc.it/pvgis/>>.
- [15] Enviweb *Sluneční energie* [online]. [cit. 21. 5. 2008]. Dostupné z URL: <[http://www.enviweb.cz/?secpart=archiv\\_ghjha/Slunecni\\_energie.html](http://www.enviweb.cz/?secpart=archiv_ghjha/Slunecni_energie.html)>.
- [16] Wikipedia *Měnič napětí* [online]. [cit. 25. 5. 2008]. Dostupné z URL: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Měnič\\_napětí](http://cs.wikipedia.org/wiki/Měnič_napětí)>.
- [17] Wikipedia *Heating degree day* [online]. [cit. 25. 5. 2008]. Dostupné z URL: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Heating\\_degree\\_day](http://en.wikipedia.org/wiki/Heating_degree_day)>.
- [18] Solartec *Fotovoltaické panely* [online]. [cit. 24. 5. 2008]. Dostupné z URL: <<http://www.solartec.cz/cs/vyrobky-a-sluzby/technicke-udaje/panely.html>>.
- [19] Solartec *Minipanely* [online]. [cit. 24. 5. 2008]. Dostupné z URL: <<http://www.solartec.cz/cs/vyrobky-a-sluzby/technicke-udaje/minipanely.html>>.
- [20] Solartec *Solární regulátory* [online]. [cit. 24. 5. 2008]. Dostupné z URL: <<http://www.solartec.cz/cs/vyrobky-a-sluzby/technicke-udaje/regulatory.html>>.
- [21] Silektro *Fotovoltaické panely* [online]. [cit. 24. 5. 2008]. Dostupné z URL: <<http://www.silektro.cz/index.php?Title=Fotovoltaick%C3%A9%20panely>>.
- [22] Silektro *Akumulátory* [online]. [cit. 24. 5. 2008]. Dostupné z URL: <<http://www.silektro.cz/index.php?Title=Akumul%C3%A1tory%20Fiamm%20SP>>.
- [23] Fulgurbattman *Mascot 8862 12V-24V/1,7A* [online]. [cit. 24. 5. 2008]. Dostupné z URL: <<http://www.fulgurbattman.cz/?page=detail&detail=18135&cs1id=210>>.
- [24] Eltodo *Parkovací automaty* [online]. [cit. 24. 5. 2008]. Dostupné z URL: <<http://wwwx.eltodo.cz/>>.



- [25] Eltodo *Dopravní značky* [online]. [cit. 24. 5. 2008]. Dostupné z URL: <<http://www.eltodo.cz>>.
- [26] Conrad.cz *Solární osvětlení domovního čísla* [online]. [cit. 24. 5. 2008]. Dostupné z URL: <[http://www.conrad.cz/Files/id6%5Ckatalogy%5C08%5CCZ\\_katalog\\_08\\_176-177.pdf](http://www.conrad.cz/Files/id6%5Ckatalogy%5C08%5CCZ_katalog_08_176-177.pdf)>.

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$c$	rychlost světla ( $300000\text{ km.s}^{-1}$ )
$C_A$	kapacita akumulátoru ( $Ah$ )
$D$	procentní pokles jmenovitého výkonu za rok provozu (%)
$D/G$	poměr difúzního ku globálnímu záření ( $-$ )
$E_A$	akceptorová energetická hladina ( $eV$ )
$E_C$	energetická hladina vodivostního pásu ( $eV$ )
$E_D$	donorová energetická hladina ( $eV$ )
$E_F$	hladina Fermiho energie v intrinzickém polovodiči ( $eV$ )
$E_{FN}$	hladina Fermiho energie v polovodiči N ( $eV$ )
$E_{FP}$	hladina Fermiho energie v polovodiči P ( $eV$ )
$E_{JA7}$	spotřeba elektrické energie jízdenkovým automatem za 7 dní ( $Wh$ )
$E_M$	elektrická energie vyrobená za měsíc ( $kWh$ )
$E_{MAX}$	maximální spotřebovaná elektrická energie ( $kWh$ )
$E_R$	elektrická energie vyrobená za rok s výkonem $P_R$ ( $kWh$ )
$E_S$	střední spotřeba elektrické energie ( $Wh$ )
$E_V$	energetická hladina valenčního pásu ( $eV$ )
$f$	frekvence ( $Hz$ )
$G_{90}$	energie záření dopadá na svislou plochu ( $Wh.m^{-2}$ )
$G_D$	denní průměr globálního záření pro čtvereční metr plochy zadaného systému ( $Wh.m^{-2}$ )
$G_H$	energie záření dopadá na vodorovnou plochu ( $Wh.m^{-2}$ )
$G_M$	měsíční průměr globálního záření pro čtvereční metr plochy zadaného systému ( $Wh.m^{-2}$ )
$G_{OPT.}$	energie záření dopadá na optimálně skloněný a natočený panel ( $Wh.m^{-2}$ )
$h$	Planckova konstanta ( $Js$ )

$I_{\text{MAX}}$	maximální proud ( $^{\circ}$ )
$I_{\text{N}}$	jmenovitý proud ( $A$ )
$I_{\text{OPT.}}$	optimální sklon panelu ( $^{\circ}$ )
$N_{\text{A}}$	koncentrace akceptorů ( $m^{-3}$ )
$N_{\text{D}}$	koncentrace donorů ( $m^{-3}$ )
$N_{\text{DD}}$	hodnota koeficientu HDD (Heating degrees-days) ( $-$ )
$P_{\text{MAX}}$	maximální příkon ( $W$ )
$P_{\text{N}}$	jmenovitý příkon ( $W$ )
$P_{\text{R}}$	výkon fotovoltaického panelu na konci roku R ( $W$ )
$P_{\text{S}}$	střední příkon ( $W$ )
$R$	rok provozu fotovoltaického panelu
$S_{-}$	suma nedostatků vyrobené energie za rok ( $kWh$ )
$T$	perioda ( $s$ )
$T_{24}$	průměrná teplota za 24 hodin ( $^{\circ}C$ )
$T_{\text{D}}$	průměrná denní teplota ( $^{\circ}C$ )
$T_{\text{L}}$	Linkeho atmosférický zákal ( $-$ )
$U_{\text{A}}$	napětí akumulátoru ( $V$ )
$U_{\text{D}}$	difúzní napětí ( $V$ )
$U_{\text{N}}$	jmenovité napájecí napětí ( $V$ )
$U_{\text{P}}$	fotovoltaické napětí ( $V$ )
$X$	rozdíl dodávky a spotřeby elektrické energie ( $kWh$ )
$\Delta E_{\text{A}}$	Energie pro přechod z $E_{\text{V}}$ do $E_{\text{A}}$ ( $eV$ )
$\Delta E_{\text{D}}$	Energie pro přechod z $E_{\text{D}}$ do $E_{\text{C}}$ ( $eV$ )
$\Delta E_{\text{g}}$	šířka zakázaného pásu ( $eV$ )
$\lambda$	vlnová délka ( $m$ )

AM množství vzduchu ležící v cestě slunečním paprskům – Air Mass factor

ERÚ Energetický regulační úřad

EU Evropská unie – European Union

EVA etyvinylacetát

FV fotovoltaický - photovoltaic

GRID-OFF nepřipojený na síť

GRID-ON připojený na síť

HDD Heating Degree Days

LED Světlo-vyzařující dioda – Light-emitting diode

MPO Ministerstvo průmyslu a obchodu – Ministry of Industry and Trade

MŽP Ministerstvo životního prostředí – Ministry of the Environment

OPPI Operační program podnikání a inovace

OPŽP Operační program životního prostředí

PPI index průmyslové inflace – Producer Price Index

PVF-PET-PVF polyvinylidenfluorid-polyetyléntereftalát-polyvinylidenfluorid

PVGIS Fotovoltaický geografický informační systém – Photovoltaic Geographical Information System

PV-TRAC Výzkumná rada pro fotovoltaické technologie – Photovoltaic Technology Research Advisory Council

## SEZNAM PŘÍLOH

A Podpora fotovoltaických technologií v Evropě	77
B Mapy slunečního svitu v České republice	79
C Roční průběhy veličin slunečního svitu získaných z PVGIS pro dané umístění	81
D Roční průběhy veličin získaných z PVGIS pro zvolený FV panel	84
E Vývoj nákladů pro varianty napájení jízdenkového automatu	86
F Návrh akumulátoru informativní značky pro celoroční provoz	87
G Přiložené CD	89

## A PODPORA FOTOVOLTAICKÝCH TECHNOLOGIÍ V EVROPĚ

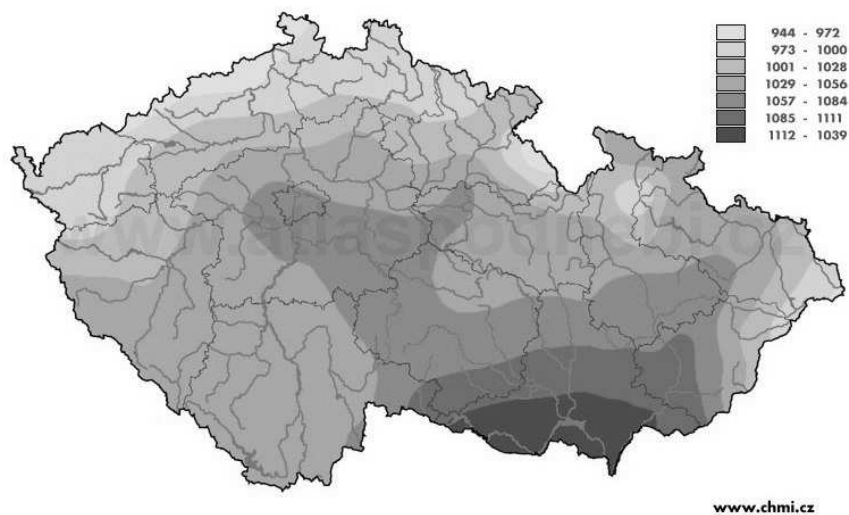
Tab. A.1: Národní programy podpory FV v zemích EU a Švýcarska [10]

Belgie	výkupní tarif 0,15 €/kWh
Česká republika	výkupní tarif 0,2 €/kWh, snížené DPH a dotace ve výši 30% (soukromé instalace i 2 kW, komerční instalace i 20 kW), systém podpory využívání obnovitelných zdrojů energie
Dánsko	žádný konkrétní program na podporu FV, ale dohodnutá cena za zelenou elektřinu
Estonsko	výkupní tarif 0,07 €/kWh; systém podpory využívání obnovitelných zdrojů energie; zelené certifikáty
Finsko	dotace až do výše 40%
Francie	výkupní tarif 0,15 €/kWh pro systémy < 1 MW na 20 let na půdě kontinentální Francie, výkupní tarif 0,30 €/kWh v zámořských částech a na Korsice; 5,5% daňové zvýhodnění investic na existujících budovách, 15% daňové zvýhodnění pro soukromé provozovatele (40% v roce 2005)
Irsko	program využívání obnovitelných zdrojů elektrické energie (žádné programy týkající se FV)
Itálie	výhodný výkupní tarif zavedený v roce 2006, investiční dotace
Kypr	výkupní tarif 0,12 - 0,26 €/kWh; investiční dotace až 55% pro soukromé instalace a až 40% pro společnosti
Litva	výkupní tarif výkupní tarif 0,056 €/kWh
Lotyšsko	výkupní tarif - dvojnásobek průměrné prodejní ceny - cca 0,15 €/kWh na 8 let, potom regulace na běžnou prodejní cenu; národní investiční programy
Lucembursko	výhodné výkupní tarify pro malé systémy; pro systémy < 50 kW: státní organizace 0,25 €/kWh a soukromí investoři 0,45 €/kWh, pro systémy > 10 kW, dotace až do výše 40%
Maďarsko	výkupní tarif 0,073 €/kWh do roku 2010; zvýhodněné půjčky; daňové zvýhodnění
Malta	dosud žádný specifický FV program; pouze daňové zvýhodnění

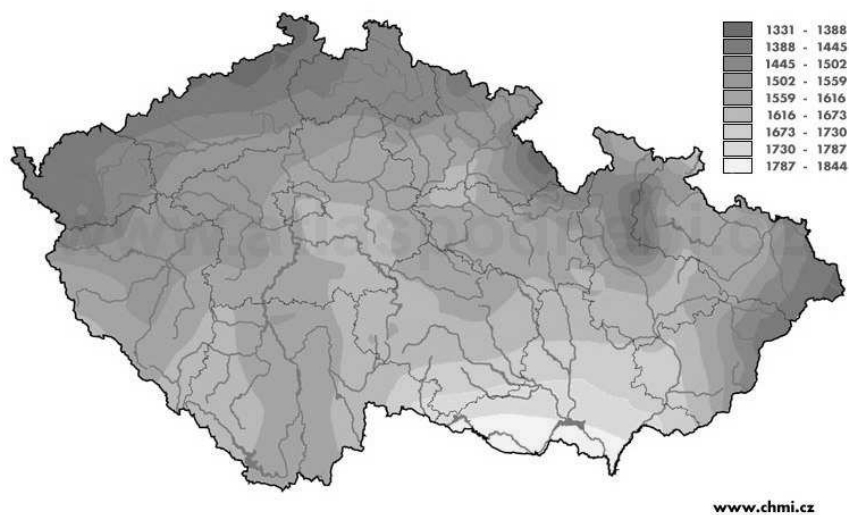
Tab. A.2: Pokračování tabulky A.1

Německo	zvýhodněný tarif na 20 let, minimální výkupní cena 0,46 €/kWh, budovy a zvukové bariéry: 0,57 €/kWh (< 30 kW), 0,55 €/kWh (> 30 kW) a 0,54 €/kWh (> 100 kW), pro FV systémy integrované do budov bonus 0,05 €/kWh
Nizozemsko	výkupní tarif 0,068 €/kWh
Polsko	investiční pobídky, bezúročné půjčky, dotace až 50%
Portugalsko	zvýhodněný tarif 0,41 €/kWh (systémy do 5 kW); 0,224 €/kW (systémy nad 5 kW); investiční dotace a daňové srážky
Rakousko	zvýhodněný tarif platný 20 let - limit celkového instalovaného výkonu 15 MW, pouze pro systémy instalované v roce 2003 a 2004, limit byl dosažen během 4 týdnů; 0,6 €/kWh (do 20 kW) a 0,47 €/kWh (nad 20 kW)
Řecko	zvýhodněný tarif: 0,08 €/kWh na ostrovech, 0,07 €/kWh na pevnině; dotace pro 40 - 50% celkových nákladů (určeny pouze pro komerční aplikace, ne pro soukromé účely)
Slovensko	žádný konkrétní program na podporu FV, zvýhodněné půjčky
Slovinsko	zvýhodněný tarif: 0,37 €/kWh (< 36 kW), 0,065 €/kWh (> 36 kW) na 10 let; zvýhodněné půjčky; dotace až 40% ceny GRID-OFF systému
Spojené království	investiční pobídky v rámci fotovoltaického demonstračního programu
Španělsko	nové zvýhodněné tarify přijaty v roce 2004; 0,396 €/kWh (< 100 kW, dříve 5 kW), 0,216 €/kWh (> 100 kW) na 25 let a garancí 80% výkupní ceny po této době, nový zákon rovněž zvedl limit instalovatelného výkonu z 50 MW na 150 MW
Švédsko	žádný specifický fotovoltaický program
Švýcarsko	výkupní tarif minimálně 0,10 €/kWh; investiční pobídky v některých regionech

## B MAPY SLUNEČNÍHO SVITU V ČESKÉ REPUBLICE

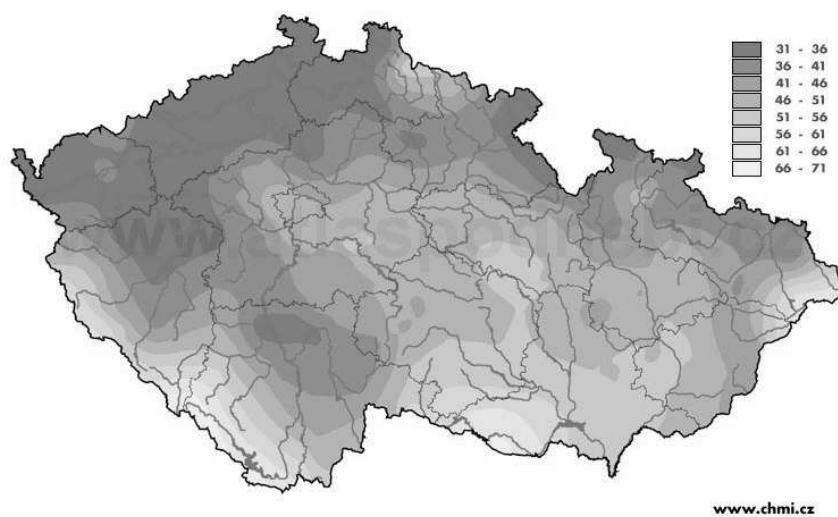


Obr. B.1: Roční průměrný uhrn slunečního záření [15]



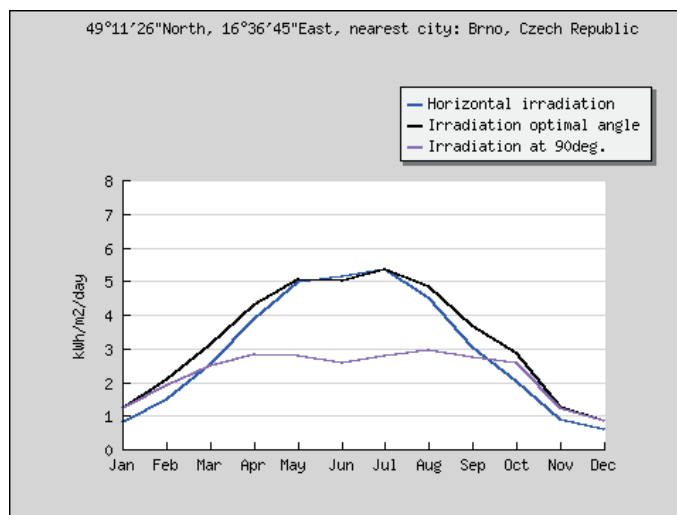
Obr. B.2: Roční průměrná doba slunečního záření [15]



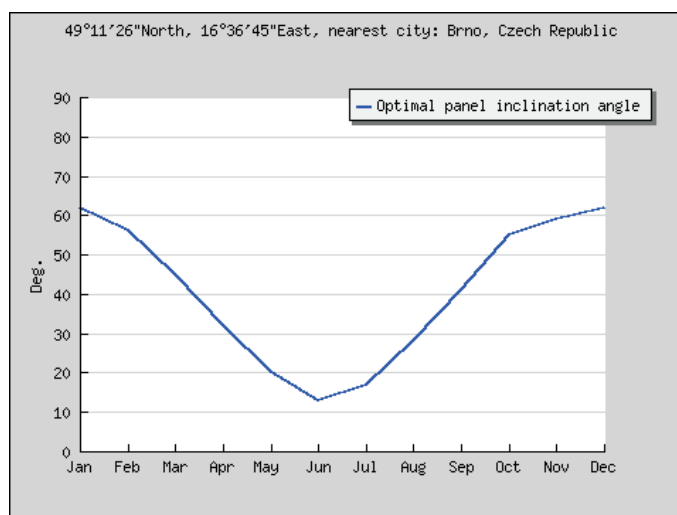


Obr. B.3: Roční průměrný počet bezoblačných dní [15]

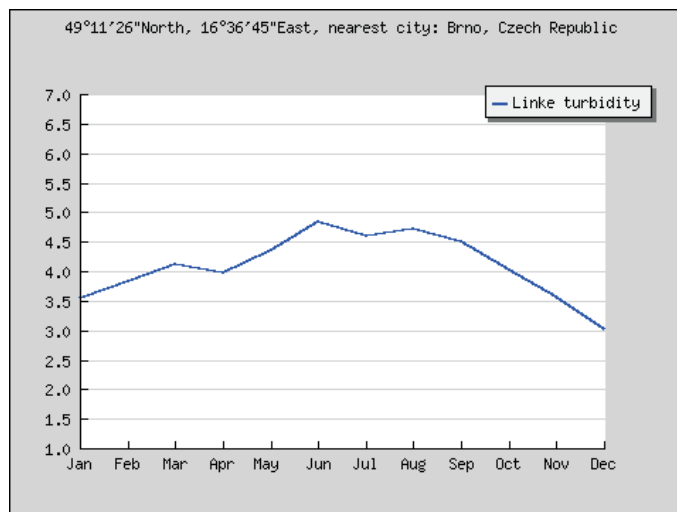
## C ROČNÍ PRŮBĚHY VELIČIN SLUNEČNÍHO SVITU ZÍSKANÝCH Z PVGIS PRO DANÉ UMÍSTĚNÍ



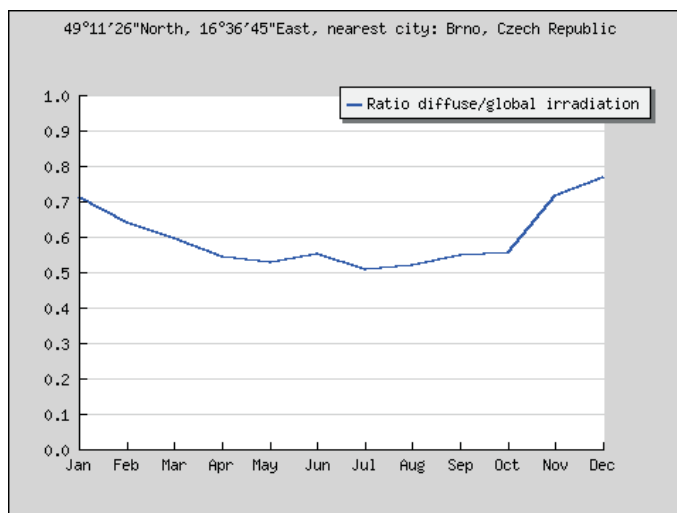
Obr. C.1: Průběh slunečního svitu ve vybrané lokalitě během roku[14]



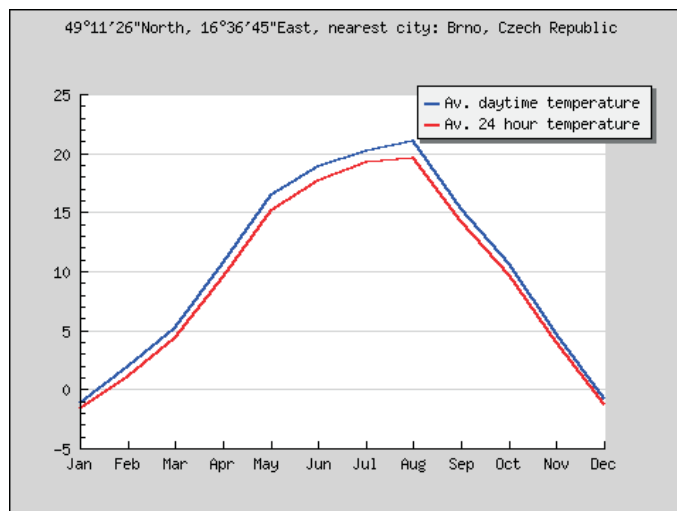
Obr. C.2: Průběh úhlu ideální sklonu panelu během roku[14]



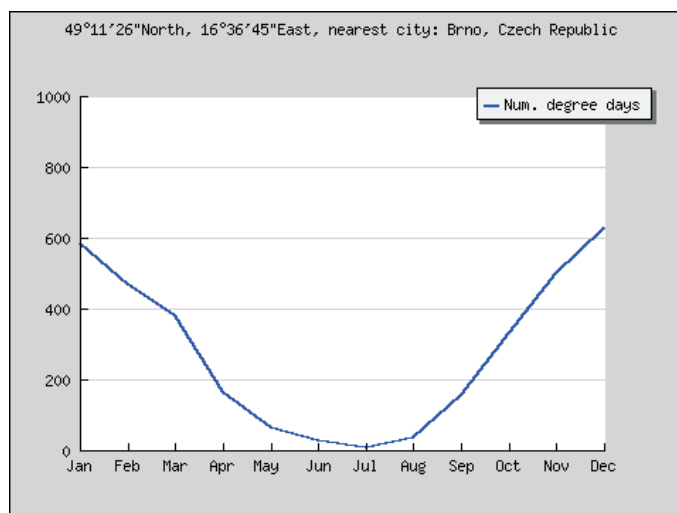
Obr. C.3: Průběh Linkeho atmosferického zákalu během roku[14]



Obr. C.4: Průběh poměru difúzního ku globálnímu záření ve vybraném místě během roku[14]

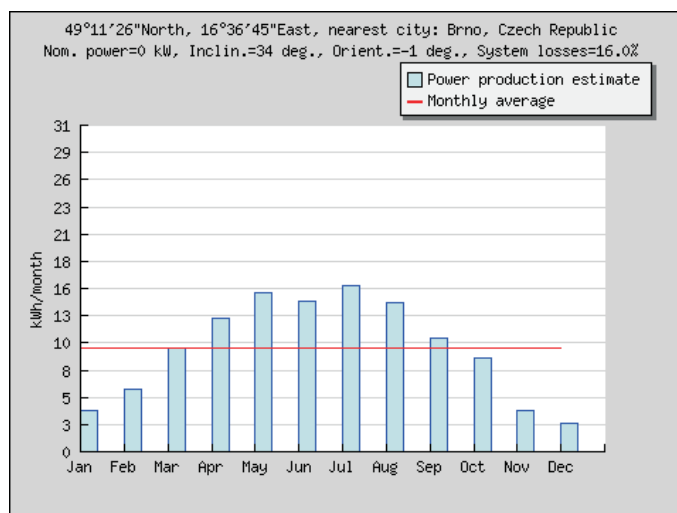


Obr. C.5: Průběh průměrné denní a 24 hodinové teploty během roku[14]

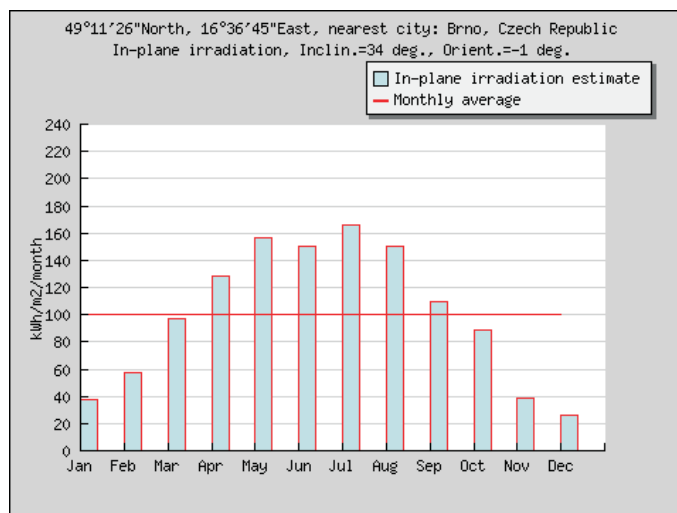


Obr. C.6: Průběh koeficientu HDD během roku pro dané místo[14]

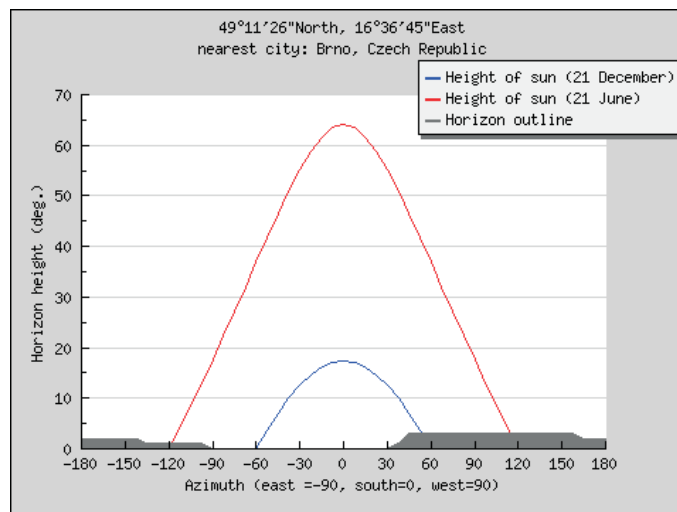
## D ROČNÍ PRŮBĚHY VELIČIN ZÍSKANÝCH Z PVGIS PRO ZVOLENÝ FV PANEL



Obr. D.1: Předpokládána měsíční vyrobená elektrická energie[14]



Obr. D.2: Předpokládané průměrné osvětlení panelu[14]



Obr. D.3: Mezní chody Slunce po obloze v roce[14]

## E VÝVOJ NÁKLADŮ PRO VARIANTY NÁPÁJENÍ JÍZDENKOVÉHO AUTOMATU

Tab. E.1: Vývoj nákladů pro jednotlivé varianty řešení napájení ve sledovaném období

Rok provozu	Varianta řešení napájení				
	FV	Pozn.	S1	S2	S3
0	35951,5		7500	55500	22011,5
1	35951,5		10743	58743	25254,5
2	35951,5		13986	61986	28497,5
3	35951,5		17229	65229	31740,5
4	35951,5		20472	68472	34983,5
5	35951,5		23715	71715	38226,5
6	35951,5		26958	74958	41469,5
7	35951,5		30201	78201	44712,5
8	35951,5		33444	81444	47955,5
9	35951,5		36687	84687	51198,5
10	35951,5		39930	87930	54441,5
11	47277,5	AKU	43173	91173	57684,5
12	60927,5	FV	46416	94416	60927,5
13	60927,5		49659	97659	64170,5
14	60927,5		52902	100902	67413,5
15	60927,5		56145	104145	70656,5
16	60927,5		59388	107388	73899,5
17	60927,5		62631	110631	77142,5
18	60927,5		65874	113874	80385,5
19	60927,5		69117	117117	83628,5
20	60927,5		72360	120360	86871,5

*Pozn.:*

**AKU - výměna akumulátorů** po 10. letech provozu: *11 326,0 Kč*

**FV - výměna fotovoltaického panelu** po 11. letech provozu: *13 650,0 Kč*

## F NÁVRH AKUMULÁTORU INFORMATIVNÍ ZNAČKY PRO CELOROČNÍ PROVOZ

Tab. F.1: Návrh akumulátoru pro roční provoz

				$E_B$			
				1. rok provozu		2. rok provozu	
<b>Měsíc</b>	$E_M$	$E_A$	$X$	začátek	konec	začátek	konec
Leden	2,64	3,41	-0,77	3,00	2,23	0,79	0,02
Únor	4,02	3,19	0,83	2,23	3,00	0,02	0,85
Březen	6,65	3,41	3,24	3,00	3,00	0,85	3,00
Duben	8,56	3,30	5,26	3,00	3,00	3,00	3,00
Květen	10,20	3,41	6,79	3,00	3,00	3,00	3,00
Červen	9,65	3,30	6,35	3,00	3,00	3,00	3,00
Červenec	10,60	3,41	7,19	3,00	3,00	3,00	3,00
Srpen	9,57	3,41	6,16	3,00	3,00	3,00	3,00
Září	7,22	3,30	3,92	3,00	3,00	3,00	3,00
Říjen	5,97	3,41	2,56	3,00	3,00	3,00	3,00
Listopad	2,65	3,30	-0,65	3,00	2,35	3,00	2,35
Prosinec	1,85	3,41	-1,56	2,35	0,79	2,35	0,79
<b>Průměr</b>	<b>6,63</b>						
<b>Rok</b>	<b>79,50</b>	<b>40,26</b>					



Tab. F.2: Vývoj jmenovitého výkonu fotovoltaického během provozu

<b>R</b>	<b>D</b>	<b>Pr</b>	<b>Er</b>	<b>X</b>
1.	1	86,1	78,70	38,55
2.	2	85,3	78,00	37,85
3.	3	84,4	77,10	36,95
4.	4	83,5	76,30	36,15
5.	5	82,7	75,60	35,45
6.	6	81,8	74,80	34,65
7.	7	80,9	73,90	33,75
8.	8	80,0	73,10	32,95
9.	9	79,2	72,40	32,25
10.	10	78,3	71,60	31,45
11.	11	77,4	70,70	30,55
12.	12	76,6	70,00	29,85
13.	13	75,7	69,20	29,05
14.	14	74,8	68,40	28,25
15.	15	74,0	67,60	27,45
16.	16	73,1	66,80	26,65
17.	17	72,2	66,00	25,85
18.	18	71,3	65,20	25,05
19.	19	70,5	64,40	24,25
20.	20	69,6	63,60	23,45

## G PŘILOŽENÉ CD

- Elektronická verze bakalářské práce, licenční smlouva a metadata ve formátu pdf